

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

Ing. Michal Kohoutek

**METODA FYZIKÁLNÍHO MODELOVÁNÍ
PŘECHODOVÝCH HRAN V OBRAZE PRO
URČENÍ SKUTEČNÉ POZICE OBRYSU
PŘEDMĚTU**

**Image Transition Edge Physical Modeling Method for
Exact Object Shape Position Determination**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor:	Teleinformatika
Školitel:	doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.
Oponenti:	
Datum obhajoby:	

KLÍČOVÁ SLOVA

Optická měření, subpixelová měření, subpixelová detekce hran, zpracování obrazů, telecentrický optický systém, modelování hran, detekce obrysu.

KEYWORDS

Optical measurements, subpixel measurements, subpixel edge detection, image processing, telecentric optic, edge modeling, shape detection.

Disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00.

© Michal Kohoutek, 2008

ISBN

ISSN

OBSAH

1 ÚVOD.....	4
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	6
2.1 Soudobé konstrukční přístupy v oblasti přesných metrologických aplikací pro měření geometrických rozměrů – 2D profilometrie	6
2.2 Metody subpixelové detekce hrany v obraze	8
3 CÍLE DISERTACE	12
4 KONCEPCE A KOMPLEXNÍ FYZIKÁLNÍ ANALÝZA POUŽITÉHO ZOBRAZOVACÍHO SYSTÉMU	13
4.1 Telecentrické zobrazení v předmětovém prostoru s telecentrickým chodem světelných paprsků – z pohledu geometrické optiky	14
4.2 Odvození fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu na základě zákonů Fourierovské optiky	16
4.2.1 Analýza zobrazovací soustavy dle pravidel Fourierovské optiky	17
4.3 Odvození vztahu pro určení skutečné pozice obrysu předmětu v rámci modelu zobrazení	18
4.3.1 Teoretický vliv různé úrovně rozostření optické soustavy na určení pozice obrysu předmětu zájmu	19
4.3.2 Stanovení dostupné hloubky předmětového pole pro model zobrazení	19
4.3.3 Posouzení vlivu příčného zvětšení na odezvu fyzikálního modelu zobrazení.....	21
4.4 Odvození fyzikálního modelu přechodové hrany v obraze	21
5 NÁVRH METODY APROXIMACE PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE ODVOZENÝM FYZIKÁLNÍM MODELEM	21
5.1 Modelování přechodové hrany pomocí polynomiální aproximace Fresnelových integrálů	21
5.2 Vliv vzorkování obrazu přechodové hrany CCD snímačem	23
5.3 Metoda optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí	23
5.3.1 Souhrn doporučení pro realizaci metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí	24
6 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI METODY S REÁLNÝMI DATY	27
7 ZÁVĚR.....	29
LITERATURA	31
Vlastní publikace	32

1 ÚVOD

Předkládaná disertační práce je tématicky zařaditelná do oblasti moderních specializovaných metod zpracování digitálních obrazů určených pro specifické průmyslové aplikace. V posledním desetiletí zažívá oblast digitálního zpracování obrazů velký rozmach základního i aplikovaného výzkumu. Tento rozmach vědecké a výzkumné činnosti je v přímé souvislosti s masovým rozšířením kamerových zobrazovacích systémů do nejrozličnějších oblastí průmyslu a rovněž i do řady spotřebitelských aplikací. Společným znakem nově vznikajících metod zpracování obrazů je odklon od výzkumu všeobecně aplikovatelných teoretických metod zpracování obrazů, které jsou již do značné míry ustálené a poskytují pouze malý prostor k dalšímu bádání. Zřejmý je naopak příklon k metodám využívajícím stále více apriorních informací ze specifických oblastí jejich konkrétního nasazení. Tyto specializované metody zpracování digitálních obrazů umožňují dosahovat v dané oblasti výrazně kvalitnější výsledky právě díky hlubší a detailnější analýze zkoumané problematiky z různých úhlů pohledu.

Prvotním podnětem pro vznik tématu disertační práce se stalo řešení grantového projektu MPO ČR „Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na prototypu 2D testeru“ zahájeného v roce 2002. V rámci projektu byla navržena koncepce měřicího systému pro přesné měření geometrických rozměrů ok sít používaných v průmyslu. Autor předkládané disertační práce se stal součástí řešitelského kolektivu v průběhu druhého roku řešení projektu a podílel se na komplexním programovém vybavení měřicího systému. Výstupem řešení projektu se stal v roce 2005 prototyp měřicího systému pro automatické měření rozměrů ok v průmyslových sítích, dle příslušných norem ČSN ISO [23], [24], [25]. Při nasazení měřicího systému do průmyslových podmínek se ukázalo, že stěžejní měřicí metoda, byť založená na nových, ovšem obecných přístupech subpixelové detekce pozice hran objektů v obraze nedosahuje požadované přesnosti. Prototyp měřicího systému tedy nebylo možné podstoupit akreditačnímu procesu a následnému průmyslovému nasazení. Na základě uvedených zjištění vznikl požadavek na vypsání tématu této disertační práce, s cílem vytvořit teoreticky fyzikálně podloženou měřicí metodu, schopnou s daným zařízením dosáhnout požadované přesnosti a tedy zisku akreditace a následného průmyslového nasazení prototypu měřicího systému.

Další výzkum v uvedené oblasti již neprobíhal v rámci řešitelského kolektivu, ale byl samostatným vědeckým bádáním autora disertační práce. V průběhu výzkumu se ukázalo, že příčina nevhodnosti použití obecných subpixelových metod detekce hran v obraze tkví v absenci přímé souvislosti použité měřicí metody subpixelové detekce hrany s fyzikální podstatou získávání obrazu konkrétním zobrazovacím systémem. Stručně je tento nesoulad prezentován v následující kapitole disertační práce. Z uvedeného důvodu bylo nutné provést detailní fyzikální

analýzu použitého zobrazovacího systému a na podkladě získaných výsledků navrhnout měřicí metodu schopnou reálného nasazení v měřicím systému. Dále pak navrženou metodu implementovat, ověřit její přesnost a podstoupit s měřicím systémem akreditační řízení opravňující jeho reálné průmyslové nasazení.

Z hlediska struktury textu je disertační práce členěna do logicky navazujících kapitol. Úvodní část (kapitola 2) se věnuje přehledu současného stavu problematiky. Je v ní představeno srovnání aktuálnosti naplně disertační práce se současnými trendy v oblasti optických měření rozměrů, jak z pohledu konstrukce měřicího systému, tak i z pohledu používaných metod zpracování obrazů a detekce hran (obrysu) předmětu. V kapitole 3 jsou detailně specifikovány cíle disertační práce.

Kapitola 4 je věnována komplexní fyzikální analýze použitého zobrazovacího systému. V úvodu je upřesněna a definována koncepce zobrazovacího systému. Následně je provedena nezbytná analýza jeho jednotlivých částí z pohledu geometrické optiky. V další části je prezentováno odvození fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu na základě zákonů Fourierovské optiky a z něj vycházející odvození fyzikálního modelu přechodové hrany předmětu zájmu ve snímací rovině. Dále je odvozen vztah pro určení přesné pozice obrysu předmětu v rámci fyzikálního modelu přechodové hrany. Na konci kapitoly je provedena diskuse možných negativních vlivů jednotlivých parametrů modelu na přesnost určení pozice obrysu předmětu.

V rámci kapitoly 5 je odvozena modelující funkce přechodové hrany v podobě vhodné pro vlastní programovou implementaci do měřicího systému. Na základě diskuse apriorních informací a podoby reálných obrazových dat produkovaných zobrazovacím systémem je navržena implementačně nezávislá metoda optimalizované aproximace jasových hodnot (pixelů) přechodové hrany odvozenou modelující funkcí. Tato metoda je specifikována ve formě implementačních doporučení z důvodu zachování její nezávislosti na použitém programovacím jazyce a ponechání programátorské volnosti při její realizaci. V závěru kapitoly jsou prezentovány výsledky dosažené implementovanou metodou při použití syntetických vstupních dat.

Kapitola 6 je zaměřena na ověření funkčnosti navržené a implementované metody s reálnými obrazovými daty. Metoda byla za tímto účelem implementována v programovacím jazyce LabView 6.1 do měřicího systému. Ukázka způsobu ověření přesnosti vytvořené metody je provedena formou prezentace výsledků měření kalibrovaných etalonů délky.

V přílohách disertační práce jsou doloženy doklady o akreditaci měřicího systému příslušným akreditačním orgánem (ČIA – Český institut pro akreditaci) pro měření veličiny délky v rozmezí $40\text{ }\mu\text{m}$ – 20 mm . Dále pak ukázka výpočtu nejistot měření měřicího systému provedená podle interního předpisu pracovníkem akreditované laboratoře a výsledky mezilaboratorního porovnávání měřicího systému pod záštitou ČMI (Český metrologický institut).

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

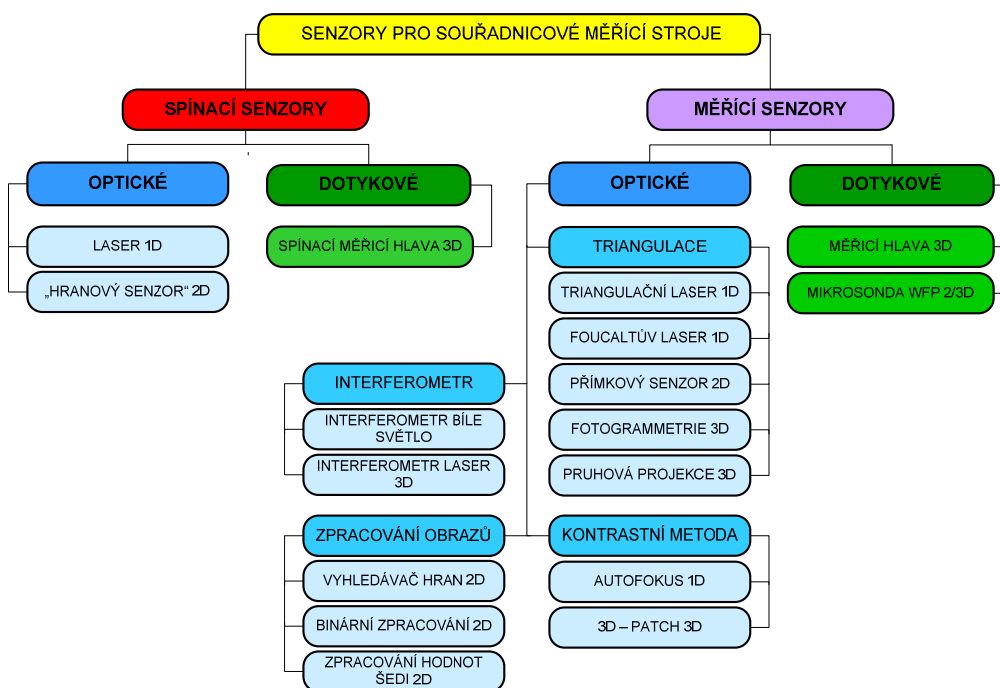
Jak bylo uvedeno výše, disertační práce je zaměřena do oblasti metod zpracování obrazů používaných spolu s kamerovými zobrazovacími systémy v přesných metrologických aplikacích pro měření geometrických rozměrů. Vzhledem k tomu, že koncepce zobrazovacího systému (konstrukční řešení a jeho prvky) již byla pro vlastní disertační práci přesně určena, bude část věnovaná této problematice rozebrána pouze jako porovnání použité koncepce se současnými průmyslovými trendy, aby byla prokázána aktuálnost použité technologie. Oproti tomu bude větší pozornost věnována současným metodám zpracování obrazů souvisejícím s oblastí detekce hran předmětů.

2.1 SOUDOBÉ KONSTRUKČNÍ PŘÍSTUPY V OBLASTI PŘESNÝCH METROLOGICKÝCH APLIKACÍ PRO MĚŘENÍ GEOMETRICKÝCH ROZMĚRŮ – 2D PROFILOMETRIE

V oblasti přesných metrologických aplikací pro měření geometrických rozměrů došlo v posledních 10 letech k dynamickému rozvoji nových měřicích přístupů. Rozvoj byl umožněn zejména technologickým pokrokem v oblastech optiky, světlocitlivých snímacích prvků, tomografických technologií a výpočetní techniky. S tímto pokrokem a rozšířením možných aplikačních oblastí pro uvedené technologie přišlo i výrazné snížení jejich cenové náročnosti a tím došlo k další akceleraci jejich použití.

Před 10 lety bylo v dané oblasti dominantní nasazení měřicích systémů založených na dotykových mechanických senzorech. Nejmodernější systémy té doby fungovaly na principu detekce přerušování laserového paprsku obrysy měřeného předmětu, který se pohyboval přesně definovanou rychlostí vůči paprsku laseru. Tyto 1D laserové systémy byly velmi náročné na údržbu a vyžadovaly použití precizních mechanických částí zaručujících vysoce stabilní a přesně definovanou rychlost pohybu. Přesnost metody byla v dominantní míře odvozena od přesnosti těchto mechanických částí, které v průběhu doby podléhaly opotřebení. Měřicí systémy pracující na uvedeném principu jsou v průmyslu stále používány a nabízeny nové, ovšem v poměru k četnosti nasazení nových typů systémů se již jedná o ustupující technologii. Oproti této úzké nabídce typů měřicích systémů z doby před 10 lety (mechanické, laserové) je současná nabídka měřicích systémů výrazně širší. Lze ji dokladovat například aktuální nabídkou německé firmy Werth Messtechnik GmbH, která je celosvětovým lídrem v oblasti multisenzorových měřicích a inspekčních systémů. V publikaci věnované problematice soudobých měřicích a inspekčních systémů [16] vydané ve spolupráci autorů knihy s uvedenou firmou je mimo jiné uveden obecný přehled soudobých senzorů (přístupů) pro souřadnicové měřicí stroje, viz obr. 2.1 V konkrétních vyráběných měřicích systémech jsou v dnešní době tyto senzory často kombinovány. Jednotlivé typy senzorů jsou v rámci knihy stručně popsány, přičemž je patrný důraz na zachování

firemního „know-how“ a to i v případě, kdy byly na semináři pořádaném k měřicímu systému zástupci firmy dotazováni na bližší specifikaci použitých metod. Toto chování je vzhledem k silně konkurenčnímu tržnímu prostředí naprosto pochopitelné. Z českého překladu knihy [16] (strana 18, 20) lze citovat následující věty: „Nejvyšší kvalitu dosahují telecentrické objektivy s pevným zvětšením.“ „Nejvyšší flexibilita se dosahuje použitím zoomovací optiky.“ „Vysoce kvalitní systémy interpolují ve druhém kroku v rámci pixelové mřížky a dovolují tak vyšší přesnosti.“



Obr. 2.1 Typy současných senzorů/přístupů využívaných v průmyslových souřadnicových měřicích systémech

Na základě výše uvedeného lze říci, že realizovaný měřicí systém je z konstrukčního hlediska a technologického hlediska stále špičkovým zařízením v oblasti 2D profilometrie, v rámci které nadále probíhá špičkový výzkum a vývoj. Z tohoto důvodu je výzkum nové metody zpracování obrazu, vedoucí ke zvýšení přesnosti měřicího systému stále aktuální. Přičemž metody použité v komerčně dodávaných zařízeních patří k utajovaným průmyslovým tajemstvím „know-how“ špičkových průmyslových firem působících v tomto oboru (Werth Messtechnik GmbH; Direct Industry; AMBIOS Technology; Micro Photonics Inc; ZYGO aj.). Koncepce vytvořeného měřicího systému včetně jeho konstrukčních detailů a její srovnání se stále aktuálními trendy je součástí řady konferenčních příspěvků členů řešitelského kolektivu a oponovaných průběžných zpráv o průběhu řešení projektu (viz například [35], [36], [42], [43], [44], [45], [46]).

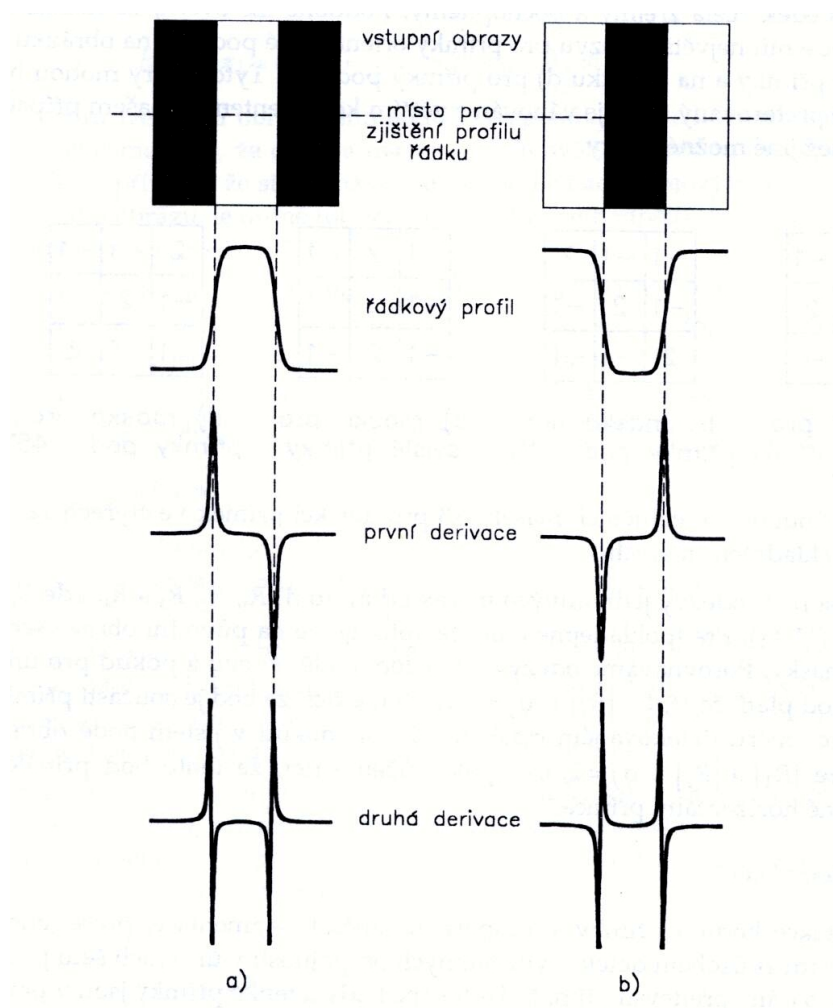
2.2 METODY SUBPIXELOVÉ DETEKCE HRANY V OBRAZE

Obecná definice hrany může znít: „Hrana je hranice mezi dvěma oblastmi s relativně rozdílnými vlastnostmi hodnot obrazových bodů“. V rámci této definice pohlíží na hranu i teorie zpracování obrazů [27], [28]. Základní přístupy k detekci hran v obrazech lze rozdělit na následující

- *metody využívající gradientní operátory - skupina operátorů aproximujících derivaci obrazové funkce pomocí diferencí realizovaných diskrétní konvolucí,*
- *metody využívající operátory druhé derivace - operátory založené na hledání hran v místech, kde druhá derivace obrazové funkce prochází nulou,*
- *metody založené na principu prahování – je známa nebo výpočetně určena informace o jas odpovídajícímu bodu hranice objektů,*
- *metody založené na porovnání hran s předlohou (řádková) – korelační metody.*

Princip detekce hran podle prvních dvou bodů je zřejmý z obr. 2.2¹. Uvedené metody v různých modifikacích slouží prvotně k určování pixelové pozice hrany. Způsoby jejich realizace a příslušný matematický aparát je možné najít v kterékoliv knize věnované problematice zpracování obrazů [27], [28]. Jejich uplatnění je zejména v algoritmech předzpracování obrazu určených k segmentaci obrazu a vyšetřování hranice objektů v obraze bez požadavku na vyšší přesnost její detekce. V této podobě jsou používány i v rámci základních metod zpracování obrazů v realizovaném měřicím systému, kde jsou součástí algoritmů rozčleňujících jednotlivé předměty zájmu (oka sít) do samostatných výřezů určených pro další zpracování měřicí metodou. Důležitým faktem je, že princip identifikace pozice hrany již na pixelové úrovni není žádným způsobem svázán s procesem tvorby obrazu a skutečná pozice původní hrany předmětu se může nacházet ve zcela jiné části jasového přechodu charakterizujícího hranu. Potvrzení neoddiskutovatelné závislosti skutečné pozice hrany předmětu (jeho obrysu) v obraze na použitém zobrazovacím systému, lze teoreticky jasně deklarovat na podkladě teorie systémů, neboť z té je zřejmý vztah popisující odezvu systému na vstupní veličinu (veličiny). Pro jednoduchost předpokládejme, že zobrazovací soustava je lineárním systémem. Odezva tohoto systému na vstupní signál, tedy snímanou obrazovou scénu je dána konvolucí impulsní odezvy lineárního systému a vstupní obrazové scény. Z uvedeného je zřejmé, že v případě, kdy je stejná scéna snímána dvěma principiálně odlišnými zobrazovacími systémy, pak i hrany objektů v obraze budou mít zcela jiné

¹ Obrázek byl převzat z diplomové práce autora této disertační práce.



Obr. 2.2 Princip detekce hrany pomocí operátorů první a druhé derivace obrazové funkce

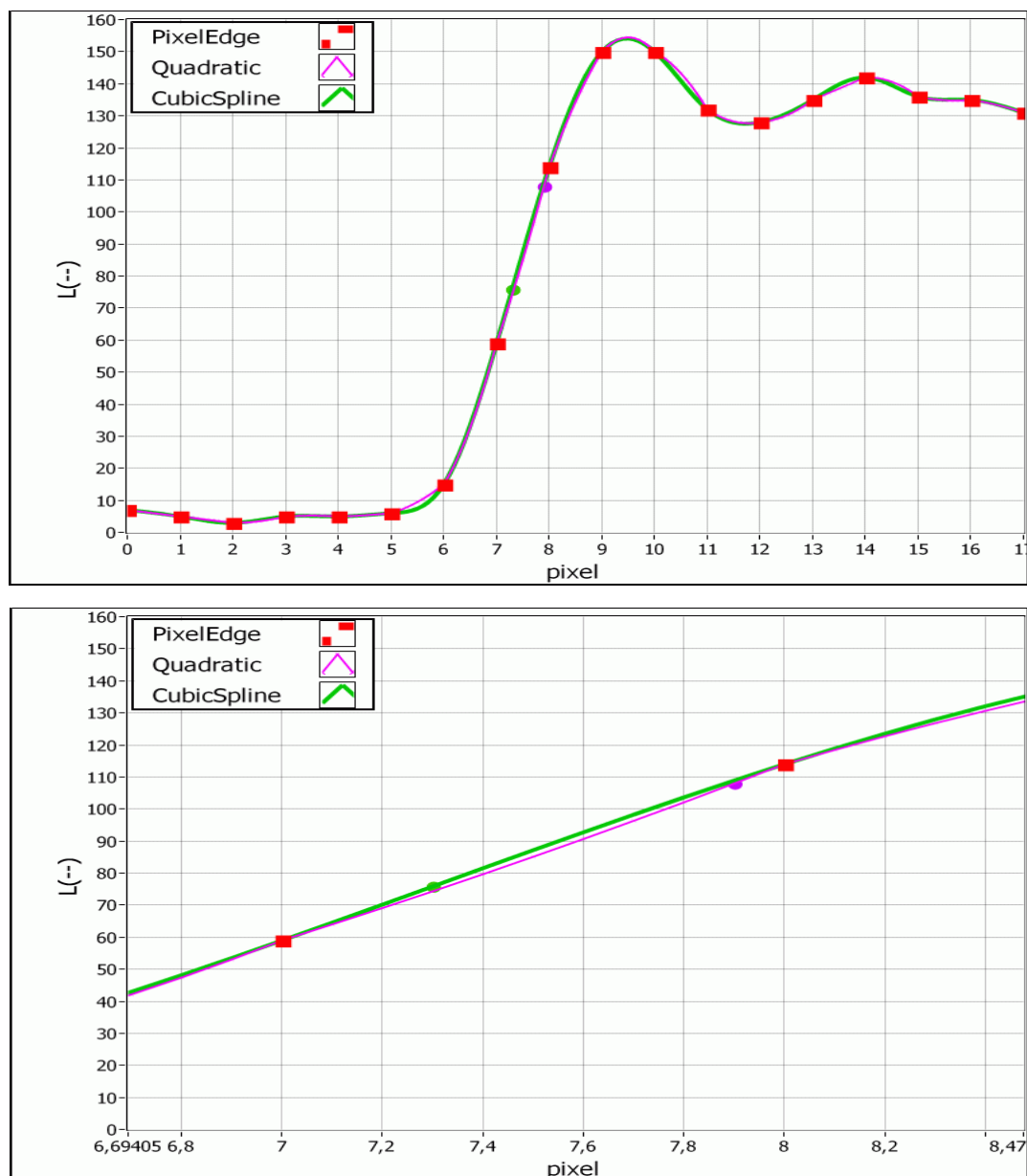
parametry a průběhy a to včetně přesné pozice obrysu předmětu v rámci odpovídajícího jasového přechodu hrany.

Již z názvu *Metody subpixelové detekce hrany v obraze* vyplývá, že cílem těchto metod je odhadnout přesnou pozici hrany předmětu (obrysu předmětu) v obraze s přesností výrazně vyšší než jeden pixel. Poté, co je nalezena pixelová pozice hrany lze metody subpixelové detekce rozdělit do dvou stěžejních kroků

- interpolace nebo aproximace jasu pixelů přechodové hrany,
- aplikace předpisu pro určení subpixelové pozice hrany v interpolovaném nebo aproximovaném hranovém přechodu.

Oba tyto kroky mají zásadní vliv na určení konečné subpixelové pozice hrany. Přesnější bude ta metoda, ve které budou oba uvedené kroky korespondovat s fyzikální realitou vytvoření měřeného obrazu. Jedny z prvních metod, které se v dnešní době ještě stále v různých modifikacích objevují, spočívaly v použití jednoduchých interpolačních technik či aproximačních algoritmů využívajících

základní křivky (kvadratická křivka, kubická křivka) pro interpolaci / aproximaci hranového přechodu. V takto modelovaném hranovém přechodu byla následně provedena detekce subpixelové pozice hrany, na základě výše uvedené teorie hran, do pozice kde první derivace modelující funkce nabývá maximální hodnoty, respektive druhá derivace modelující funkce prochází nulou. Tedy v podstatě vyšetřením inflexního bodu modelující funkce. Je zřejmé, že při použití různých modelujících funkcí a detekčních předpisů získáme různé hodnoty subpixelové pozice hrany viz obr. 2.3. Na obrázku je reálná přechodová hrana (červeně označené jasy pixelů) interpolovaná pomocí standardních metod subpixelové interpolace obrazů dodávaných firmou Nationale Instruments v rámci knihovny



Obr. 2.3 Odezvy standardních subpixelových metod, které jsou součástí knihoven programovacího jazyka LabView [17] - a) kvadratická interpolace, b) kubická „spline“ interpolace

IMAQ programovacího jazyka LabView. První metodou je „quadratic interpolation“ [17] – fialový průběh, druhou je „cubic spline interpolation“ [17] - zelený průběh. V případě obou interpolací byla subpixelová pozice hrany určena dle metody vyšetření inflexního bodu. V obrázku jsou detekované subpixelové pozice hrany označeny bodem příslušné barvy. Pro „quadratic interpolation“ odpovídala detekovaná subpixelová pozice hrany pozici 7,9 pixelu, zatímco pro „cubic spline interpolation“ byla detekovaná subpixelová pozice hrany 7,3 pixelu. Nelze říci, která hodnota je přesnější, neboť ani jedna metoda nemá přímou souvislost s fyzikálním procesem vytváření přechodové hrany v obraze.

V poslední době se v oblasti teorie zpracování digitálních obrazů objevila řada nových metod a přístupů k subpixelové detekci pozice hrany v obraze. Jednotlivé metody se od sebe vzájemně odlišují použitými interpolačními, případně aproximačními funkcemi a způsoby optimalizace jejich proložení jasovými hodnotami přechodové hrany v obraze. Z hlediska následného určení subpixelové pozice hrany v obraze vychází většina čistě teoretických metod nadále z teorie hran a určuje subpixelovou pozici hrany do místa inflexního bodu modelující funkce. Oproti dřívějším metodám je možné pozorovat znatelný růst jejich výpočetní složitosti a zároveň snahy o výpočetní optimalizaci a snadnou algoritmizaci. Jsou například cíleny na potlačení vlivu různých typů šumů při subpixelové detekci hrany, jako je tomu v případě metody [30]. Objevují se i nové složitější a preciznější způsoby detekce subpixelové pozice hrany pomocí různých obdob geometrických momentů, jako je tomu u metod [31] a [32], či nelineárních metod interpolace přechodové hrany [33]. Většina těchto metod však nadále postrádá přímou souvislost mezi konkrétním procesem vytváření obrazových dat, tvarem použité modelující funkce hrany a vlastní metodou detekce subpixelové pozice hrany. Proto nejsou ve vysoce přesných metrologických aplikacích použitelné. Výjimečně se již publikují i metody vycházející ve svých principech z fyzikální reality tvorby obrazových dat, jako například metoda popsaná v [29], která se zabývá využitím řádkových snímačů pro detekci subpixelové pozice hrany. Eventuálně práce [34], která se zabývá možností zlepšení subpixelové přesnosti (rozlišení) zobrazování při použití osvětlení vzdálených scén intenzivním laserem.

Publikace zaměřené tak, jako tato disertační práce na návrh metody fyzikálního modelu přechodové hrany v obraze pro určení skutečné (subpixelové) pozice obrysu předmětu nebyly v průběhu studia současného stavu problematiky nalezeny. Lze však předpokládat, že minimálně u průmyslových lídrů, uvedených v předchozí kapitole, probíhá v dané oblasti neustálý intenzivní výzkum, jehož výsledky nejsou z konkurenčních důvodů podrobně publikovány.

Provedená analýza současného stavu problematiky související s tématem disertační práce ukázala, že téma je aktuální a poskytuje dostatečný prostor pro výzkum. Návrh nového originálního řešení subpixelové detekce hran, založeného na podkladě fyzikálního modelování, má potenciál přinést pokrok v dané oblasti optických měření geometrických rozměrů předmětu.

3 CÍLE DISERTACE

Cílem disertační práce je navrhnout metodu umožňující přesnou subpixelovou detekci obrysu předmětu v jeho obraze vytvořeném definovaným zobrazovacím systémem. Při návrhu metody je požadováno přísné respektování fyzikální podstaty vytváření obrazu předmětu ve snímací rovině kamery při použití specifického typu zobrazovací soustavy. Jak bylo odůvodněno v předchozí kapitole, respektování fyzikální podstaty tvorby obrazu má přinést výrazné zpřesnění subpixelové detekce obrysu, oproti již existujícím obecným metodám a tím umožnit aplikační nasazení metody v již existujícím prototypu Tester2D, určeném pro přesná měření průmyslových sít dle příslušných norem [23], [24], [25] a požadavků ČIA a ČMI.

Jak bylo ukázáno v předchozí kapitole, subpixelová detekce pozice hrany spočívá ve dvou stěžejních krocích: 1. použití vhodné modelující funkce hrany, 2. určení subpixelové pozice obrysu v modelující funkci. Pro nalezení definice vhodné modelující funkce, respektující fyzikální realitu vytváření obrazu definovaným zobrazovacím systémem, je nutné provést komplexní fyzikální analýzu zobrazovací soustavy z hlediska zákonů geometrické a Fourierovské (vlnové) optiky. Výstup analýzy je třeba formovat do podoby fyzikálního parametrického modelu popisujícího tvar skokové přechodové hrany po jejím zobrazení definovanou zobrazovací soustavou. Detailní analýzou tohoto modelu je třeba definovat způsob určení přesné pozice obrysového bodu v rámci vytvořeného fyzikálního parametrického modelu. Dále je nutné provést vyšetření stability způsobu určení přesné pozice obrysového bodu při změně fyzikálních parametrů modelu, například z hlediska možného vlivu různé úrovně rozostření optické soustavy. Pro umožnění snadné aplikovatelnosti fyzikálního modelu v metodách zpracování obrazů je nutné upravit definici modelu do podoby modelující funkce vhodné pro implementaci. Jako nejlepší se z tohoto pohledu jeví docílení polynomiálního vyjádření modelující funkce.

Vytvořený fyzikální model je dále třeba analyzovat z hlediska dopadu prostorového vzorkování způsobeného snímáním obrazu CCD snímačem kamery. Je třeba provést diskuzi dopadů možných nežádoucích náhodných vlivů působících při vytváření obrazu reálným zobrazovacím systémem s reálnou CCD kamerou (např. tepelný šum aj.). Cílem těchto analýz je navrhnout metodu optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí. Návrh metody musí být implementačně nezávislý.

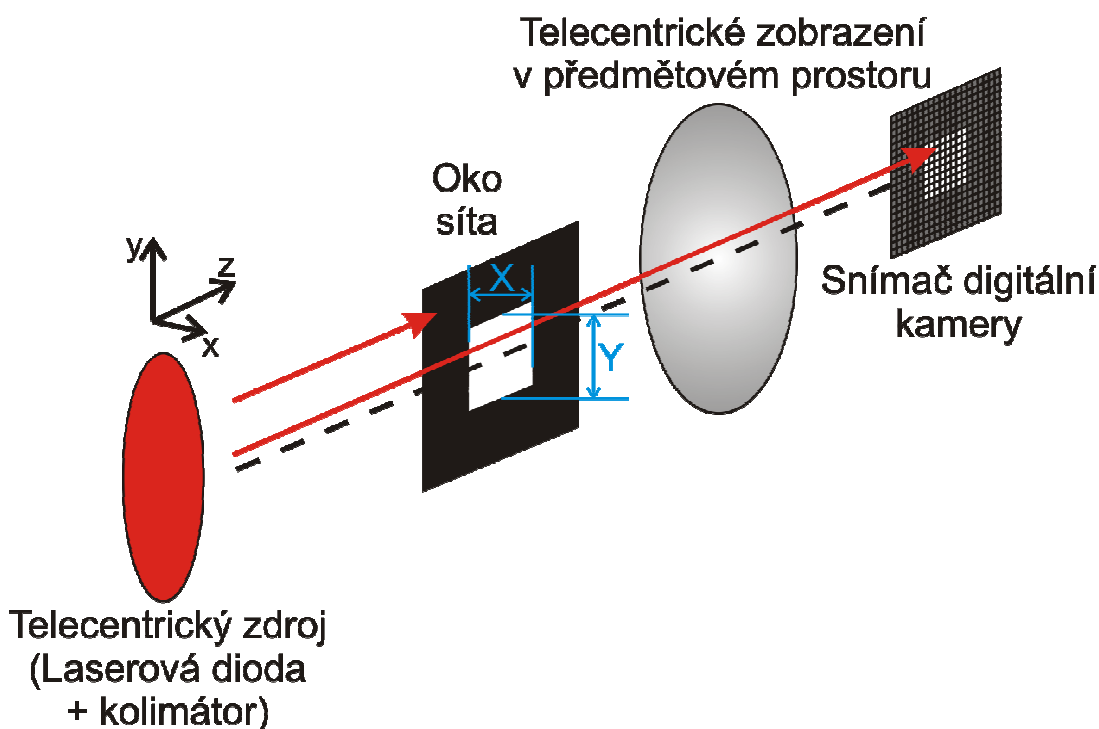
Metoda optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí má být implementována v programovacím jazyce LabView a její přesnost nejprve ověřena pomocí syntetických vstupních dat. Přesnost metody v reálných měřeních má být ověřena její implementací do měřicího systému Tester2D a následným reálným měřením etalonů délky.

Jedním z praktických cílů práce je docílit akreditace měřicího systému Tester2D a jeho nasazení v průmyslu právě díky aplikaci výsledků výzkumu

prezentovaných v disertační práci a nové originální metodě subpixelové detekce obrysu předmětu v obraze.

4 KONCEPCE A KOMPLEXNÍ FYZIKÁLNÍ ANALÝZA POUŽITÉHO ZOBRAZOVACÍHO SYSTÉMU

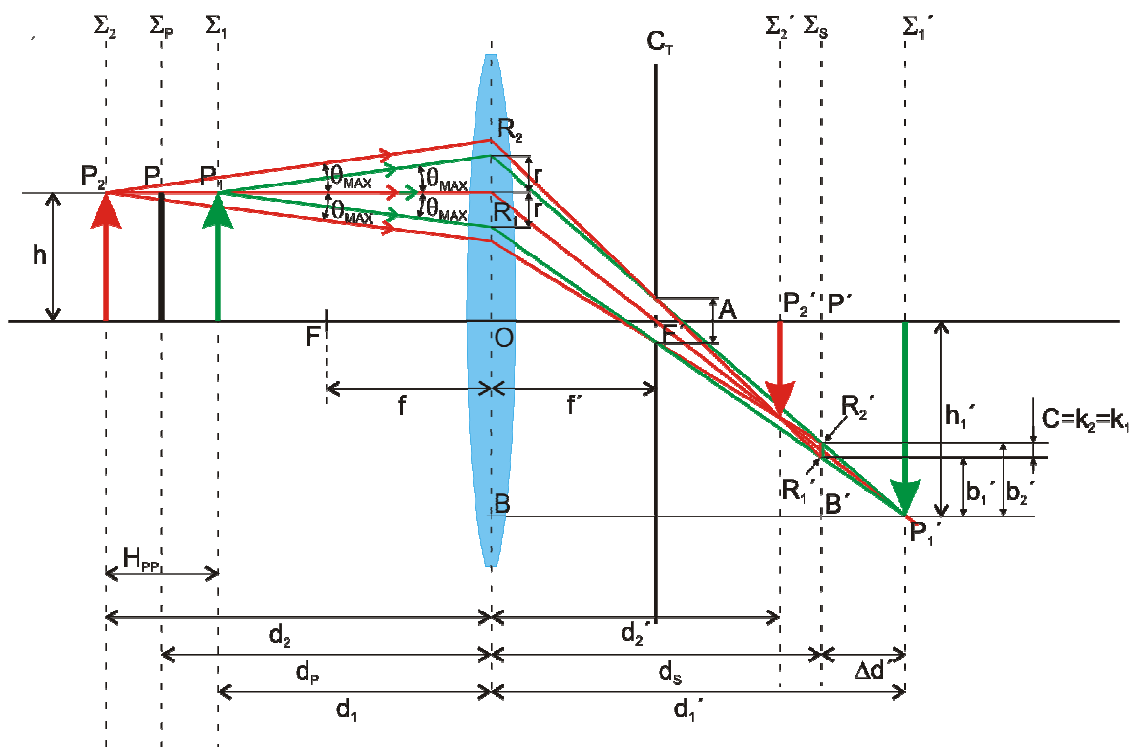
V rámci této kapitoly je představena základní koncepce zobrazovacího systému použitého v prototypu měřicího systému Tester2D. Následná fyzikální analýza jednotlivých částí zobrazovací soustavy povede k odvození fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu v místě snímáče digitální kamery. Z fyzikálního modelu zobrazení předmětu bude odvozen fyzikální model zobrazení přechodové hrany spolu se vztahem definujícím způsob určení přesné pozice obrysu předmětu v rámci modelu. Analýza vlastností fyzikálního modelu přechodové hrany povede k vyšetření stability způsobu určení přesné pozice hrany v závislosti na změně parametrů zobrazovací soustavy. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, měřicí systém byl koncepčně navržen pro měření průmyslových a potravinářských sít. Z tohoto cíleného zaměření vychází tedy i definice předmětu prvotního zájmu a cílené zaměření fyzikálních analýz na konkrétní typy komponent použitých v měřicím systému. Z obr. 4.1 je patrné, že bylo použito zadní telecentrické osvětlení předmětu. Vhodné pro měření obrysů předmětu [2]. Detailnějšímu rozboru jednotlivých částí systému jsou věnovány následující kapitoly.



Obr. 4.1 Koncepce měřicího systému

4.1 TELECENTRICKÉ ZOBRAZENÍ V PŘEDMĚTOVÉM PROSTORU S TELECENTRICKÝM CHODEM SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ – Z POHLEDU GEOMETRICKÉ OPTIKY

V rámci této kapitoly byly odvozeny výhodné vlastnosti telecentrického zobrazování v předmětovém prostoru viz obr. 4.2 vůči klasickému perspektivnímu zobrazování. Na základě diskuze odvozených parametrů byla odůvodněna vhodnost použití tohoto způsobu zobrazování pro přené metrologické aplikace.



Obr. 4.2 Vliv změny předmětové vzdálenosti při telecentrickém zobrazování v předmětovém prostoru

Hlavní výhody telecentrického zobrazování v předmětovém prostoru lze shrnout do dvou stěžejních bodů:

- *telecentrické zobrazování v předmětovém prostoru vytváří ve snímací rovině Σ_s vždy stejně velký obraz předmětu nezávisle na předmětové vzdálenosti,*
- *hlavní (telecentrický) paprsek, rovnoběžný s optickou osou soustavy v předmětovém prostoru a procházející obrazovým ohniskem v obrazovém prostoru, prochází středem příslušné kruhové stopy obrysového bodu předmětu vytvořené ve snímací rovině nezávisle na předmětové vzdálenosti. Výsledná kruhová stopa odpovídající obrysovému bodu je tedy symetrická kolem bodu daného tímto paprskem.*

Z uvedených bodů je patrné potlačení vlivu perspektivy [1]. Je ovšem nutné zdůraznit skutečnost, že obraz nebude pro všechny vzdálenosti v předmětovém prostoru ostrý a průměr kruhové stopy C stejný jako je tomu v případě uvedeném na obrázku. Tato vlastnost je způsobena konečnou velikostí *aperturní telecentrické clony* A . Jejím vlivem se na tvorbě výsledného obrazu ve snímací rovině podílejí i paprsky, které nejsou v předmětové rovině rovnoběžné s optickou osou. Z tohoto důvodu byl odvozen vztah (4-1) popisující velikost *rozptylového kroužku* C v závislosti na úrovni zaostření optické soustavy a na maximálním úhlu paprskového kužele schopného projít telecentrickou optickou soustavou.

$$C = 2 \frac{f(d_p - d_p)}{d_p - f} \operatorname{tg} \theta_{MAX}, \quad (4-1)$$

kde jednotlivé parametry jsou definovány na obr. 4.2.

Dále byl odvozen vztah (4-2) definující *hloubku předmětového pole* H_{PP} pro definovanou úroveň velikosti *rozptylového kroužku* a *průměr aperturní telecentrické clony* A .

$$H_{PP} = \frac{2C(d_p - f)}{A}, \quad (4-2)$$

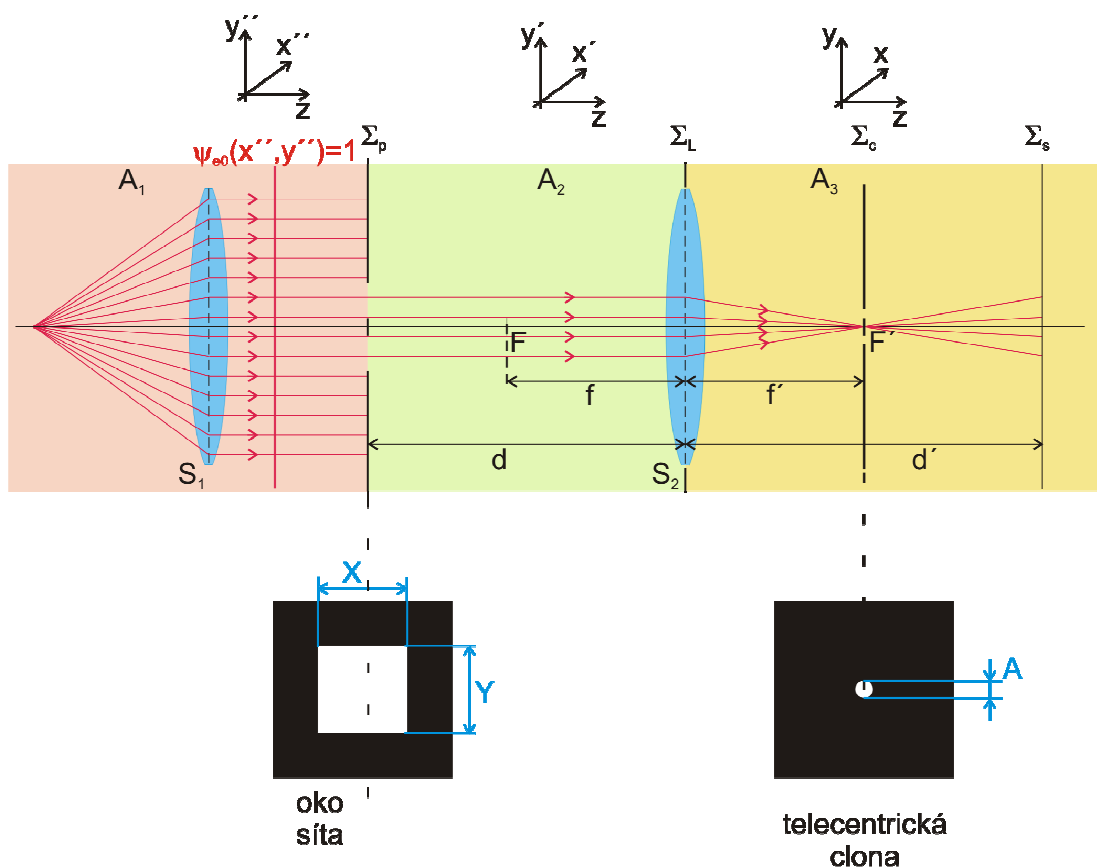
Pro odstranění závislosti *hloubky předmětového pole* na *průměru aperturní telecentrické clony* byly vyšetřeny a definovány dopady použití telecentrického zadního osvětlení. Z této analýzy vzešel vztah

$$H_{PP} = \frac{C(d_p - f)}{f \operatorname{tg} \theta_s}, \quad (4-3)$$

udávající *hloubku předmětového pole* při použití telecentrického světelného zdroje s úhlem světelného kužele $\theta_s < \theta_{MAX}$. Použitím tohoto typu osvětlení dojde k odstranění závislosti *hloubky předmětového pole* na průměru *telecentrické aperturní clony* A . Ta bude dále sloužit jako prostředek pro zachycení netelecentrických paprsků vzniklých ohybovými jevy na telecentricky osvětlovaném měřeném předmětu. Vybrané vztahy odvozené na podkladě zákonů geometrické optiky byly použity i v následujících částech disertační práce, a proto bylo jejich odvození nezbytné.

4.2 ODVOZENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU ZOBRAZENÍ PŘEDMĚTU ZÁJMU NA ZÁKLADĚ ZÁKONŮ FOURIEROVSKÉ OPTIKY

Cílem následující analýzy je nalezení matematického popisu optického zobrazení předmětu se skokovou změnou optické propustnosti, osvětleného telecentrickým světelným zdrojem a zobrazeného pomocí optické soustavy telecentrické v předmětovém prostoru. Následující obrázek představuje základní model analyzovaného zobrazovacího systému. Přičemž popisy souřadných os v jednotlivých částech obrázku korespondují se symboly používanými v rámci vlastního odvození.



Obr. 4.3 Principiální detail zobrazovací soustavy měřicího systému

Pohled na optickou soustavu telecentrickou v předmětové rovině z hlediska geometrické optiky byl uveden v předchozí kapitole. Tento způsob analýzy však neumožňuje vyšetřit rozložení intenzity optického pole v místě snímáče kamery po průchodu světelného paprsku předmětem zájmu (okem síta) a optickou soustavou s telecentrickou clonou v předmětové rovině. Znalost matematického modelu rozložení intenzity optického pole v obrazovém prostoru umožňuje odvodit matematický model zobrazení přechodové hrany předmětu zájmu a též teoretickou

pozici obrysu předmětu zájmu ve vytvořeném modelu přechodové hrany. Pro odvození modelu popisujícího rozložení intenzity optického pole v místě snímáče je nutné provést analýzu zobrazovací soustavy, uvedené na obr. 4.3, podle zákonitostí Fourierovské optiky. Z obrázku je patrné rozdělení problematiky odvození do tří hlavních oblastí, z nichž každá oblast je na obrázku odlišena barevným označením a označením souřadného systému. Osa z je ve všech oblastech neměnná s počátkem v rovině Σ_L .

První oblast (viz obr. 4.3) nese označení A_1 , je charakteristická růžovým podbarvením. Souřadný systém v této oblasti je (x'', y'', z) . Z fyzikálního hlediska se jedná o oblast tvorby osvětlení předmětu zájmu. Kolimátorem jsou zde vytvářeny paprsky telecentrického osvětlení předmětu zájmu. Jak bylo uvedeno výše, jedná se o paprsky rovnoběžné s optickou osou. Z geometrického hlediska sahá oblast A_1 zprava limitně k povrchu předmětu zájmu. V dalším odvození předpokládáme, že tento telecentrický zdroj světla vybudí v rovině předmětu zájmu Σ_p konstantní časově i prostorově invariantní vlnoplochu telecentrických světelných paprsků $\psi_{e0}(x'', y'') = 1$.

Druhá oblast je označena A_2 , je podbarvena světle zeleně a souřadný systém je definován jako (x', y', z) . Oblast je zleva limitně ohraničena předmětem zájmu (rovina Σ_p) a zprava limitně vstupní čočkou telecentrické optické soustavy označenou S_2 .

Třetí oblast je označena A_3 , je podbarvena žlutě a souřadný systém je definován jako (x, y, z) . Zleva je oblast limitně omezena vstupní čočkou telecentrické optické soustavy, zprava není na obrázku omezena. V reálném případě telecentrického objektivu by byla ohraničena případnou další čočkou starající se například o dodatečnou lineární úpravu měřítko optického zobrazení. Za předpokladu dobré kvality objektivu (minimálních optických zkreslení a deformací obrazu) není nutné tuto část objektivu zahrnout do odvození.

4.2.1 Analýza zobrazovací soustavy dle pravidel Fourierovské optiky

Detailní analýzou zobrazovací soustavy z pohledu *Fourierovské (vlnové) optiky* byl odvozen obecný komplexní model optického pole v obrazovém prostoru

$$\begin{aligned} \psi(x, y, z) = & \frac{-f}{4(z-f)} e^{-j \frac{k_0 f (x^2 + y^2)}{2z(z-f)}} \cdot \\ & \cdot [(1+j)(C(d_{x+}) - C(d_{x-}) + jS(d_{x-}) - jS(d_{x+}))] \cdot \\ & \cdot [(1+j)(C(d_{y+}) - C(d_{y-}) + jS(d_{y-}) - jS(d_{y+}))] \end{aligned} \quad (4-4)$$

kde d_{x+} a d_{x-} jsou definovány jako

$$d_{x+} = \frac{a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = \sqrt{\frac{k_0((X/2)(z-f) + fx)^2}{2(z-f)(dz - df - fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(z-f) + fx}{(dz - df - fz)} \geq 0,$$

$$d_{x+} = \frac{a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = -\sqrt{\frac{k_0((X/2)(z-f) + fx)^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(z-f) + fx}{(dz-df-fz)} < 0, \quad (4-5)$$

$$d_{x-} = \frac{-a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = \sqrt{\frac{k_0((X/2)(f-z) + fx)^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(f-z) + fx}{(dz-df-fz)} \geq 0,$$

$$d_{x-} = \frac{-a_2(X/2) + b_2}{\sqrt{a_2}} = -\sqrt{\frac{k_0((X/2)(f-z) + fx)^2}{2(z-f)(dz-df-fz)}}, \text{ pro } \frac{(X/2)(f-z) + fx}{(dz-df-fz)} < 0. \quad (4-6)$$

kde d_{y+} a d_{y-} jsou vzhledem k symetrii problému definovány analogicky k (4-5), (4-6).

Z komplexního modelu rozložení optického pole (4-4) lze na základě definice

$$I(x, y, z) = |\psi(x, y, z)|^2 \quad (4-7)$$

po provedení úprav odvodit

$$I(x, y, z) = \frac{f^2}{4(z-f)^2} \left[(C(d_{x+}) - C(d_{x-}))^2 + (S(d_{x+}) - S(d_{x-}))^2 \right] \cdot \left[(C(d_{y+}) - C(d_{y-}))^2 + (S(d_{y+}) - S(d_{y-}))^2 \right]. \quad (4-8)$$

Tento vztah lze považovat za *fyzikální model zobrazení předmětu zájmu* osvětleného telecentrickými paprsky a zobrazeného telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. Model v sobě zahrnuje difrakční jevy vznikající na povrchu předmětu a jejich přenos telecentrickou optickou soustavou v předmětovém prostoru. V rámci modelu jsou tedy definovány i tvary hranových křivek předmětu. Pomocí (4-8) lze vypočítat intenzitní obraz předmětu zájmu v libovolném bodě na ose z , při platnosti podmínky

$$z \geq \frac{df}{d-f}. \quad (4-9)$$

Z této podmínky vychází nutnost úmyslného rozostření optické soustavy do prostoru mezi předmět zájmu a vstupní čočku telecentrického objektivu.

4.3 ODVOZENÍ VZTAHU PRO URČENÍ SKUTEČNÉ POZICE OBRYSU PŘEDMĚTU V RÁMCI MODELU ZOBRAZENÍ

Vzhledem ke zřejmé symetrii problému lze pro řádkový profil zobrazení psát

$$I(x, z) = (\mathcal{C}(d_{x+}) - \mathcal{C}(d_{x-}))^2 + (\mathcal{S}(d_{x+}) - \mathcal{S}(d_{x-}))^2. \quad (4-10)$$

Detailní analýzou a diskuzí tohoto vztahu a jeho parametrů byla odvozena (4-5), (4-6) definice určující přesnou pozici obrysu předmětu v jeho intenzitním obraze. Pozice obrysu odpovídá jas

$$I_{\text{EdgePoint}}(x) = \frac{1}{4} * I_{\text{STAB}}, \quad (4-11)$$

kde $I_{\text{EdgePoint}}(x)$ - je intenzita optického pole v obrazové rovině odpovídající pozici obrysu předmětu v předmětové rovině,

I_{STAB} - je průměrná ustálená hodnota intenzity optického pole v obrazové rovině odpovídající pozici opticky propustné části předmětu v předmětové rovině.

Přesnost uvedeného vztahu pro určení pozice obrysu předmětu v obraze (4-11) byla podrobena názorné a detailní analýze. Za tímto účelem byl model (4-10) implementován v jazyce LabView.

4.3.1 Teoretický vliv různé úrovně rozostření optické soustavy na určení pozice obrysu předmětu zájmu

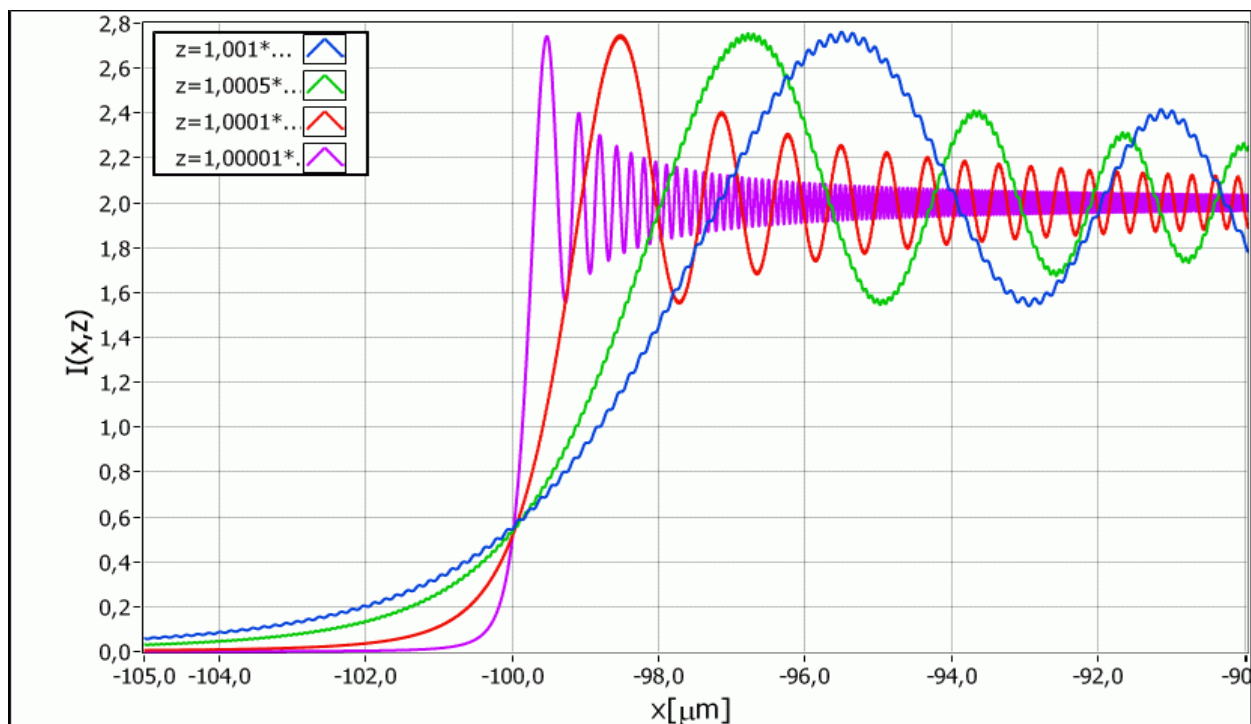
Výsledky této analýzy ukázaly, že vztah (4-11) není z teoretického hlediska závislý na úrovni rozostření optické soustavy. Tuto skutečnost lze názorně deklarovat pomocí obr. 4.4. Na obrázku jsou zobrazeny detaily odezev modelu (4-10) pro náběžnou hranu předmětu zájmu při zobrazení s následujícími parametry. Velikost předmětu zájmu $X = 200 \mu\text{m}$; $d = 0,075 \text{ m}$; $f = 0,0375 \text{ m}$ a $\lambda = 630 \text{ nm}$. Různé úrovně zaostření lze simulovat formou změny pozice snímací roviny na ose z v obrazovém prostoru. $z \in [1,001; 1,0005; 1,0001; 1,00001] * \frac{df}{(d-f)}$. Z obr. 4.4 je

zřejmé, že přechodové hrany modelu pro různé úrovně rozostření optické soustavy se vzájemně protínají právě v bodě odpovídajícím definici obrysu předmětu dle (4-11).

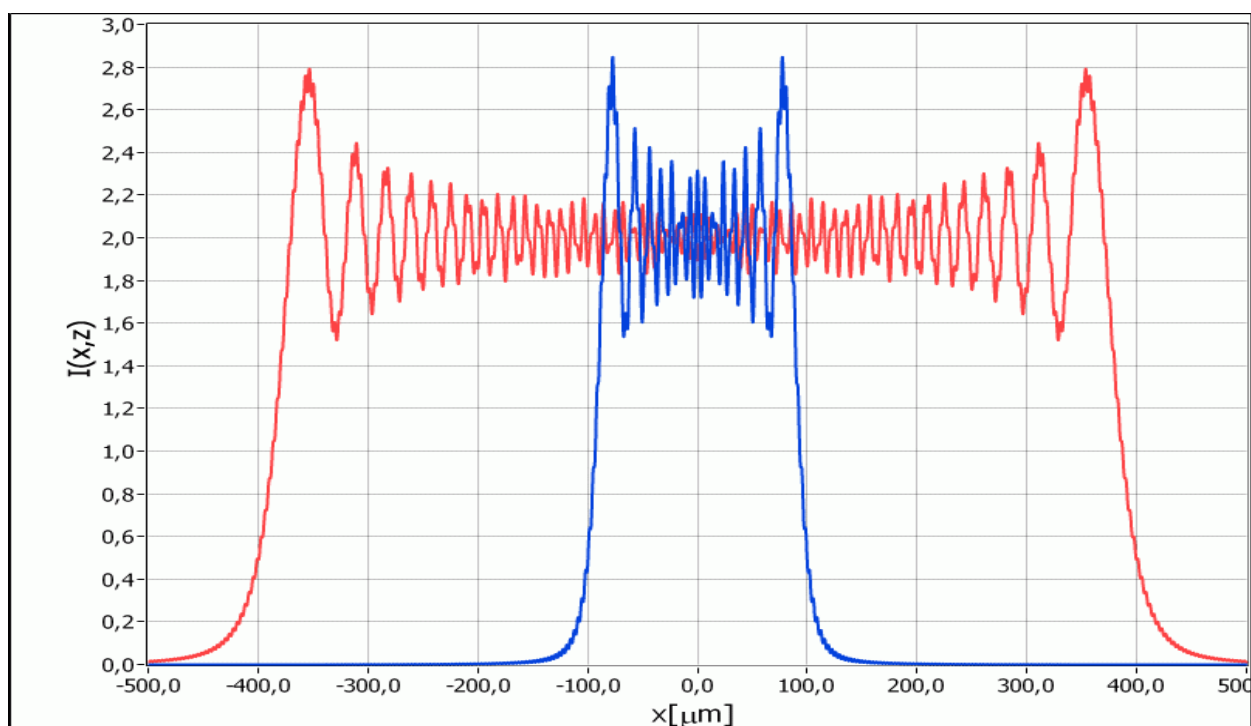
4.3.2 Stanovení dostupné hloubky předmětového pole pro model zobrazení

Při popisu úrovně rozostření optické soustavy byly v rámci kapitoly věnované pohledu na telecentrickou optickou soustavu z hlediska geometrické optiky definovány dva parametry a sice parametr *průměru rozptylových kroužků* C a s ním související parametr *hloubky předmětového pole* H_{PP} . Diskuzí těchto parametrů z hlediska *Fourierovské optiky* byla stanovena přípustná úroveň rozostření optické

² Hodnota $d=0,075 \text{ m}$ odpovídá pracovní vzdálenosti telecentrického objektivu použitého v prototypu měřicího systému.



Obr. 4.4 Detail náběžných hran fyzikálního modelu pro různé úrovně zaostření obrazu (viz legenda, kde $z = 1,001 \cdot \dots$ odpovídá zaostření $z = 1,001 \cdot \frac{df}{(d-f)}$). Náběžné hrany se pro různé úrovně zaostření obrazu protínají právě v bodě odpovídajícímu vztahu (4-11)



Obr. 4.5 Odezva fyzikálního modelu zobrazení (4-10) s následujícími parametry $X = 200 \mu\text{m}$, $C = 3,45 \mu\text{m}$, $f = 0,0375 \text{ m}$, $\theta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$. a) $M=1$ modrá křivka,
b) $M=4$ červená křivka

soustavy formou mezního průměru rozptylového kroužku jako hodnota průměru kružnice vepsané jedné světlocitlivé buňce snímací kamery.

4.3.3 Posouzení vlivu příčného zvětšení na odezvu fyzikálního modelu zobrazení

Model zobrazovacího systém byl též podroben fyzikální analýze vlivu příčného zvětšení na přesnost určení pozice obrysu předmětu. Z analýzy vyplynulo, že příčné zvětšení nemá negativní vliv na přesnost určení pozice hrany předmětu dle (4-11). Tato skutečnost je názorně deklarována na obr. 4.5.

4.4 ODVOZENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE

Na základě detailního vyšetření dopadů zanedbání vlivu vzdálené hrany na formování obrazu vyšetřované hrany byly z modelu zobrazení (4-10) odvozeny fyzikální modely přechodových hran v podobě pro sestupnou hranu

$$I_m(x) = \left(\frac{1}{2} - \mathcal{C}(d_{x-}) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - \mathcal{S}(d_{x-}) \right)^2. \quad (4-12)$$

Náběžnou hranu je možné definovat jako

$$I_m(x) = \left(\mathcal{C}(d_{x+}) - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\mathcal{S}(d_{x+}) - \frac{1}{2} \right)^2. \quad (4-13)$$

Vzhledem k symetrii problému je dostačující použít pouze jednoho z uvedených modelů, neboť přechod mezi nimi spočívá v pouhém převrácení vstupní posloupnosti. V rámci disertační práce byl také stanoven teoretický vztah pro výpočet hodnoty minimálního měřitelného předmětu zájmu.

5 NÁVRH METODY APROXIMACE PŘECHODOVÉ HRANY V OBRAZE ODVOZENÝM FYZIKÁLNÍM MODELEM

Následující část textu je věnována úpravě modelu přechodové hrany do podoby modelující funkce vhodné pro definici metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí přechodové hrany.

5.1 MODELOVÁNÍ PŘECHODOVÉ HRANY POMOCÍ POLYNOMIÁLNÍ APROXIMACE FRESNELOVÝCH INTEGRÁLŮ

Odvozený model přechodové hrany (4-13) obsahuje *Fresnelovy integrály* (obecně známé, v disertační práci blíže definované). *Fresnelovy integrály* jsou tzv.

vyšší *transcendentní funkce*, tedy funkce, které nelze v konečném tvaru vyjádřit pomocí *elementárních funkcí*. *Fresnelovy integrály* z tohoto důvodu nelze popsat například jedním polynomem, který je vhodný pro implementaci v algoritmech optimalizované aproximace reálné přechodové hrany. Z hlediska výstupů teoreticky provedených analýz se jako nejvhodnější pro návrh implementačně vhodné podoby modelu přechodové hrany ukázala aproximace fresnelových integrálů dle Moshier [13] a [14], která pro oblast argumentu x , $0 \leq |x| \leq 1,6008$ aproximuje *Fresnelovy integrály* pomocí racionálních lomených funkcí. Střední kvadratická odchylka uvedeného způsobu aproximace *Fresnelových integrálů* se oproti jiným způsobům jejich výpočtu pohybuje v řádu $1 \cdot 10^{-16}$ dle [13].

Použitím intervalové aproximace *Fresnelových integrálů* racionálními lomenými funkcemi na model (4-13) je po optimalizaci v programu Maple získána následující podoba modelující funkce přechodové hrany

$$I_{M_edge}(x) = 0,25 * \left(\left(\frac{P_A(d_{X+})}{Q_A(d_{X+})} \right)^2 + \left(\frac{P_B(d_{X+})}{Q_B(d_{X+})} \right)^2 \right), \quad (5-1)$$

kde d_{X+} je definováno vztahem (4-5) a

$$\begin{aligned} P_A(t) = & 3,99982969 \cdot 10^8 t^{24} - 9,976862291 \cdot 10^{12} t^{21} + 9,154392158 \cdot 10^{10} t^{20} + \\ & + 1,900856126 \cdot 10^{15} t^{17} + 1,250018625 \cdot 10^{13} t^{16} - 1,290382871 \cdot 10^{17} t^{13} + \\ & + 1,222627890 \cdot 10^{15} t^{12} + 3,776866388 \cdot 10^{18} t^9 + + 8,680295429 \cdot 10^{16} t^8 - \\ & - 4,11051819 \cdot 10^{19} t^5 + 4,121420907 \cdot 10^{18} t^4 + 2 \cdot 10^{20} t + 1 \cdot 10^{20} \end{aligned} \quad (5-2)$$

$$\begin{aligned} Q_A(t) = & 3,99982969 \cdot 10^8 t^{24} + 9,154392158 \cdot 10^{10} t^{20} + 1,250018625 \cdot 10^{13} t^{16} + \\ & + 1,222627890 \cdot 10^{15} t^{12} + 8,680295429 \cdot 10^{16} t^8 + 4,121420907 \cdot 10^{18} t^4 + 1 \cdot 10^{20}, \end{aligned} \quad (5-3)$$

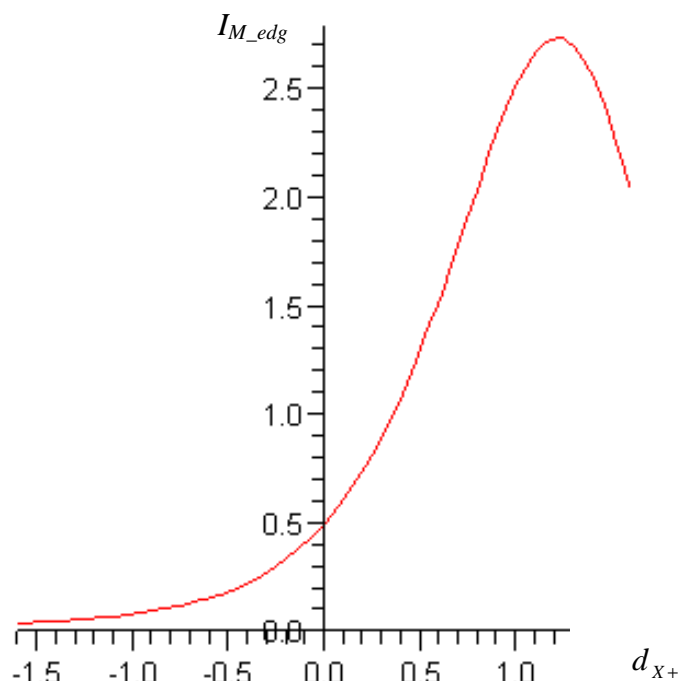
$$\begin{aligned} P_B(t) = & 1,250000000 \cdot 10^7 t^{24} - 7,479547985 \cdot 10^{10} t^{23} + 3,517203361 \cdot 10^9 t^{20} + \\ & + 1,772100113 \cdot 10^{13} t^{19} + 5,698097635 \cdot 10^{11} t^{16} - 1,574353716 \cdot 10^{15} t^{15} + \\ & + 6,46679861 \cdot 10^{13} t^{12} + 6,372272015 \cdot 10^{16} t^{11} + 5,241503075 \cdot 10^{15} t^8 - , \\ & - 1,10748795 \cdot 10^{18} t^7 + 2,805147446 \cdot 10^{17} t^4 + 7,950407445 \cdot 10^{18} t^3 + \\ & + 7,592079870 \cdot 10^{18} \end{aligned} \quad (5-4)$$

$$\begin{aligned} Q_B(t) = & 1,250000000 \cdot 10^7 t^{24} + 3,517203361 \cdot 10^9 t^{20} + 5,698097635 \cdot 10^{11} t^{16} + \\ & + 6,466798610 \cdot 10^{13} t^{12} + 5,241503075 \cdot 10^{15} t^8 + 2,805147446 \cdot 10^{17} t^4 + . \\ & + 7,592079870 \cdot 10^{18} \end{aligned} \quad (5-5)$$

Model přechodové hrany (5-1) založený na polynomiální aproximaci přechodových oblastí *Fresnelových integrálů* je platný v rozsahu hodnot argumentu

$$|d_{x+}| \leq 1,6008. \quad (5-6)$$

Průběh odezvy modelu v tomto rozsahu je zobrazen na



Obr. 5.1 Průběh polynomiální modelující funkce přechodové hrany (5-1)

5.2 VLIV VZORKOVÁNÍ OBRAZU PŘECHODOVÉ HRANY CCD SNÍMAČEM

V rámci této kapitoly jsou vyšetřeny vlivy vzorkování obrazů reálným CCD snímačem. Nejprve jsou tyto vlivy vyšetřeny s použitím syntetických dat následně pak i vzhledem k podobě reálných přechodových hrany získaných z obrazu předmětu zájmu. Závěry získané v rámci těchto analýz posloužily k formulování *metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí*.

5.3 METODA OPTIMALIZOVANÉ APROXIMACE JASOVÝCH HODNOT PIXELŮ PŘECHODOVÉ HRANY MODELUJÍCÍ FUNKCÍ

Pro umožnění optimalizace aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí byla odvozena následující podoba vztahu (5-1)

$$I_{M_edge}(x) = 0,25 * \left(\left(\frac{P_A(\kappa(\tau + x))}{Q_A(\kappa(\tau + x))} \right)^2 + \left(\frac{P_B(\kappa(\tau + x))}{Q_B(\kappa(\tau + x))} \right)^2 \right), \quad (5-7)$$

vhodná pro optimalizovanou aproximaci.

5.3.1 Souhrn doporučení pro realizaci metody optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí

V následující kapitole je formou implementačních doporučení popsána strategie modelování reálné pixelové přechodové hrany modelující funkcí (5-7). Jednotlivá doporučení vycházejí z apriorních informací získaných při teoretických odvozeních, z výše uvedených závěrů řady diskuzí vlivu jednotlivých parametrů modelu zobrazení a z poznatků získaných testováním různých podob implementace aproximace jasových hodnot reálné přechodové hrany modelující funkcí (5-7).

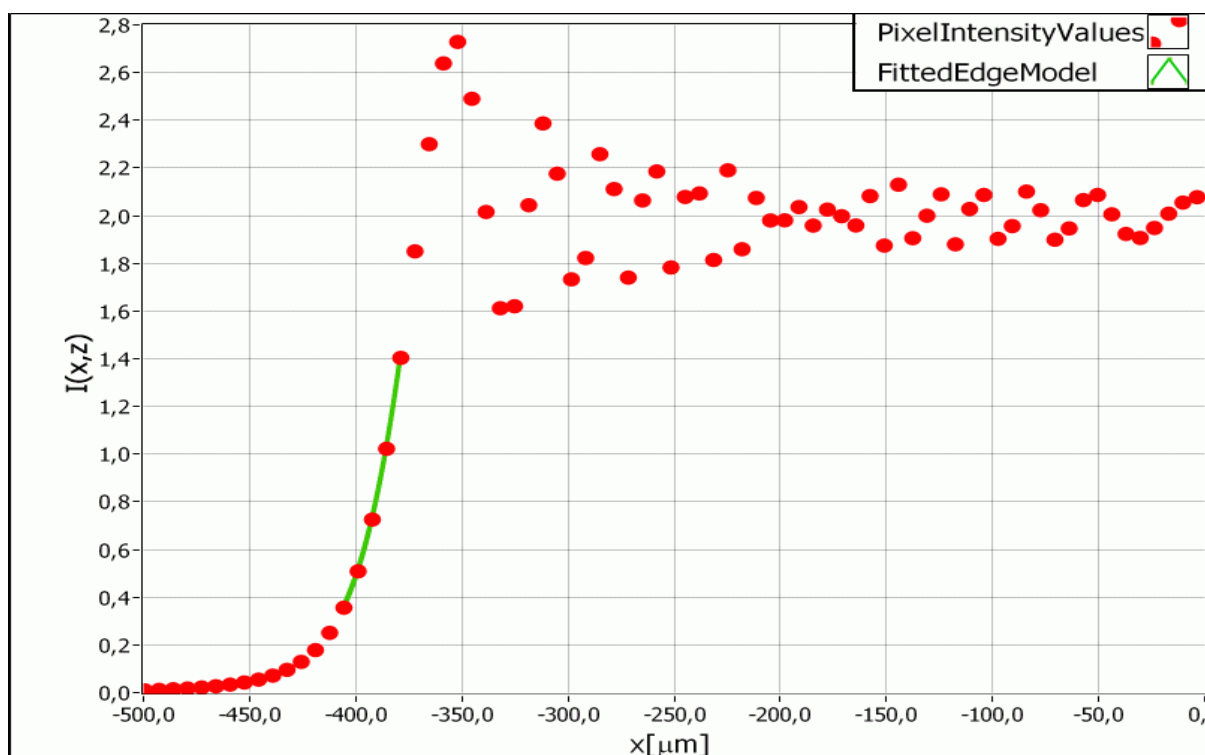
- *Přechodová hrana modelu (4-13) je plně formována Fresnelovými integrály v rozsahu argumentu $|x| \leq 1,5$ (viz kapitola 4.4), a proto lze použít aproximaci Fresnelových integrálů uvedenou v kapitole 5.1 a z ní vycházející modelující funkci přechodové hrany (5-1), respektive (5-7) platnou pro rozsah argumentů dle (5-6).*
- *Vlivem vzorkování obrazové funkce dochází k podvzorkování zákmítů v opticky propustné části předmětu, a tudíž nelze tyto hodnoty použít pro optimalizaci proložení modelující funkce jasovými hodnotami obrazové hrany.*
- *Podvzorkováním nemohou být zasaženy jasové hodnoty obrazové hrany s jasnem menším než jas odpovídající prvnímu minimu fyzikálního modelu (4-13) v opticky propustné části bezprostředně za přechodovou hranou. Hodnotu prvního minima za přechodovou hranou v rámci fyzikálního modelu lze odvodit a jak je patrné z obr. 4.4, nemění se s úrovní rozostření optické soustavy. Do procesu optimalizace proto zahrneme pouze ty pixely přechodové hrany, které mají hodnotu jasu menší než úroveň prvního minima za přechodovou hranou. V případě obrazového jasového průběhu normovaného vzhledem k fyzikálnímu modelu na ustálenou hodnotu jasu opticky propustné části předmětu je vhodné s rezervou volit hodnotu prahu 1,5.*
- *Z přijatelně ustálených hodnot jasu v opticky propustné části lze statistickým výpočtem stanovit hodnotu jasu odpovídající ustálené hodnotě fyzikálního modelu pro opticky propustnou část předmětu. Tato hodnota je poté využitelná pro normování obrazových jasových hodnot hrany do rozsahu hodnot modelující funkce (5-7).*
- *Hodnoty jasu pro opticky nepropustnou část předmětu (geometrický stín) jsou vzhledem k vlastnostem reálné kamery, zejména tepelnému šumu, významně zatíženy vysokou relativní chybou. Z tohoto důvodu je vhodné vypustit tyto hodnoty ze souboru hodnot určených k aproximaci modelující funkcí přechodové hrany (5-7). Do procesu*

optimalizované aproximace modelující funkcí proto zahrneme pouze pixely s jasnem vyšším a rovným hodnotě nezbytně nutné pro určení přesné pozice obrysového bodu dle (4-11). Za nositele nezbytně nutné hodnoty jasů je přitom považován pixel s jasnem bezprostředně nižším než hodnota odpovídající předpokládané pozici obrysového bodu předmětu dle (4-11). V případě normovaného jasového průběhu se jedná o hodnotu jasů pixelu bezprostředně nižší hodnotě 0,5.

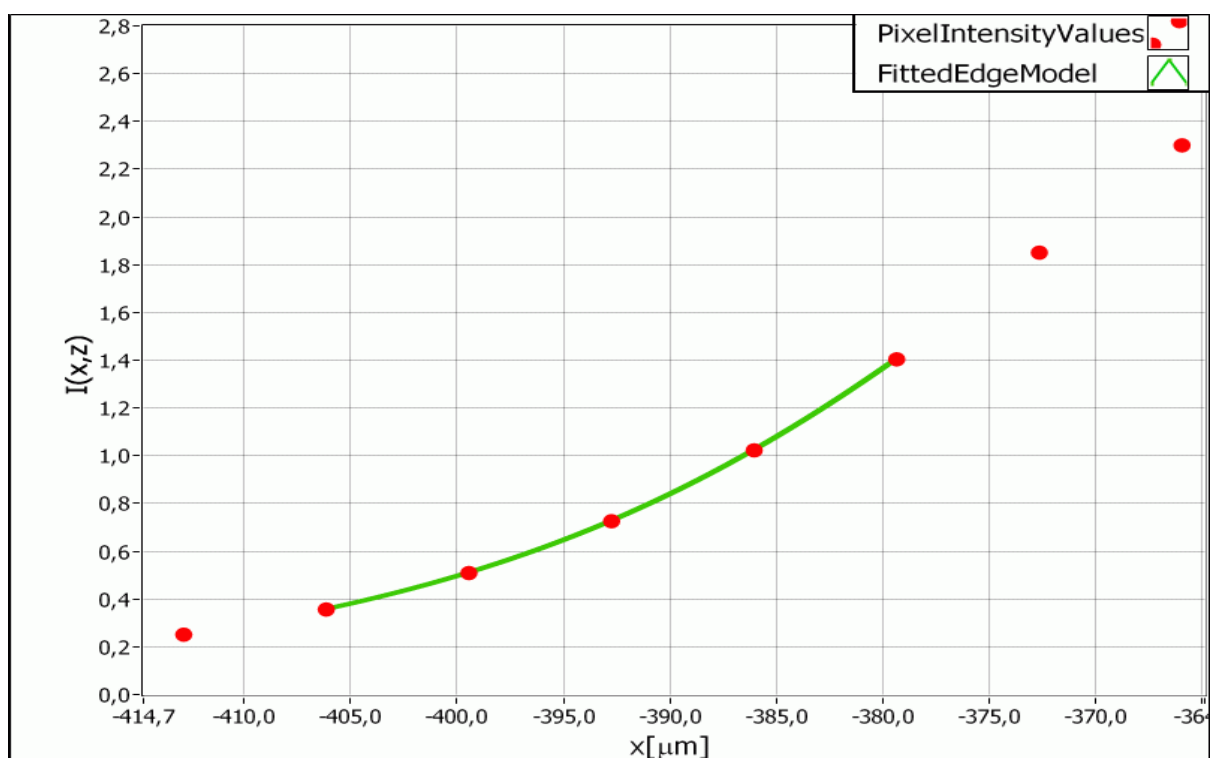
- *Pozice obrysového bodu předmětu v obraze je definována dle (4-11). V případě modelovaného normovaného průběhu je pozice obrysového bodu přímo dána subpixelovou polohou odpovídající hodnotě 0,5.*
- *Při hledání optimálních parametrů aproximace vybraných jasových hodnot je nutné vzít v úvahu změnu rozsahu parametru d_{x+} modelující funkce (5-7) a pro aproximaci použít pouze odpovídající úsek modelující funkce (viz obr. 5.1)³.*

Algoritmus respektující uvedená doporučení byl implementován v programovacím jazyce LabView. Pro optimalizaci parametrů κ , τ modelující funkce přechodové hrany (5-7) byla použita interní LabView implementace *Levenberg-Marquardt* [15] optimalizačního algoritmu. Na obr. 5.2 je zobrazen výsledek optimalizované aproximace přechodové hrany, jejíž body byly získány vzorkováním modelu přechodové hrany (4-13), pro zvolené parametry zobrazovacího systému. Pozice odpovídající skutečné hraně předmětu se pro model před vzorkováním nacházela v hodnotě $-400\ \mu\text{m}$, přičemž při určení skutečné pozice obrysu předmětu v obraze podle vztahu (4-11) z proložené modelující funkce (5-7) je získána hodnota $-400,04\ \mu\text{m}$. Relativní i absolutní chyba určení pozice při použití navrženého algoritmu se syntetickými daty je tedy zanedbatelná. V rámci testování algoritmu se syntetickými daty byla tato skutečnost potvrzena na reprezentativním vzorku 20 syntetických přechodových hran s různou úrovní rozostření. Výsledky testování s reálnými daty, které jsou diskutovány podrobně v dalších částech práce.

³ Tento bod je vysoce implementačně závislý a je teoreticky možné najít optimalizační algoritmus provádějící úpravu rozsahu parametru modelující funkce automaticky.



Obr. 5.2 Výsledek optimalizované aproximace vzorkované odezvy modelu přechodové hrany modelující funkcí (5-7) pomocí navrženého algoritmu



Obr. 5.3 Detail výsledku optimalizované aproximace vzorkované odezvy modelu přechodové hrany modelující funkcí (5-7) pomocí navrženého algoritmu

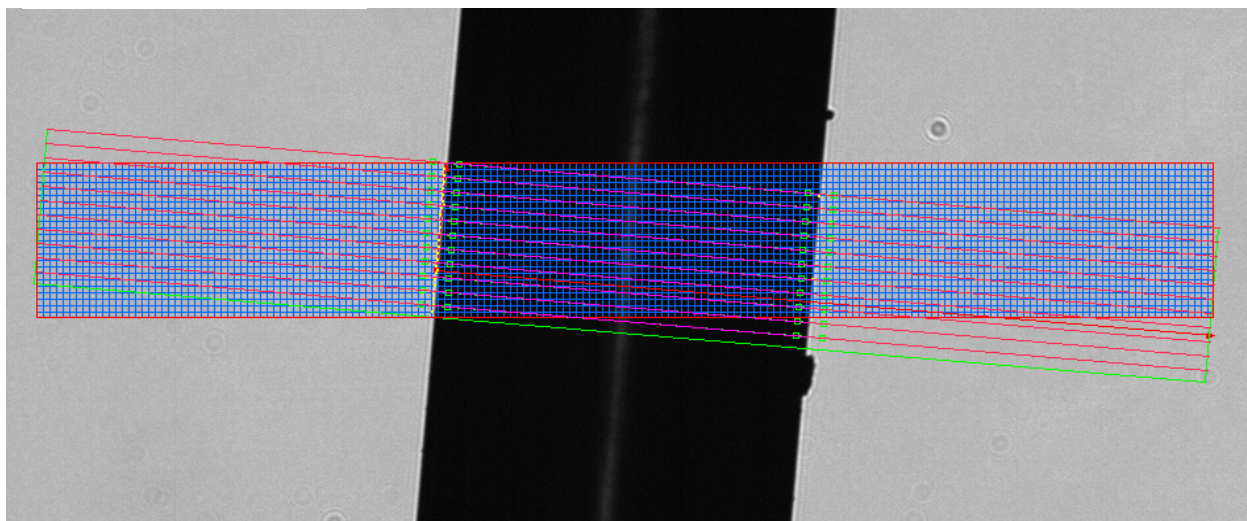
6 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI METODY S REÁLNÝMI DATY

Navržená *metoda optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů přechodové hrany modelující funkcí* byla začleněna do měřicího systému Tester2D - *Prototyp zařízení pro přesné mikrometrické testování prosévacích sít pro stavební a potravinářský průmysl*. Měřicí systém je zobrazen na obr. 6.1. Byl vyvíjen v rámci projektu *Ministerstva průmyslu a obchodu* ve spolupráci VUT v Brně a VUSH a. s. Měřicí systém byl akreditován ČIA - *Český institut pro akreditaci* a jeho přesnost dále ověřena mezilaboratorním porovnáváním pod záštitou ČMI - *Český metrologický institut*. Pro ukázkou ověření přesnosti měření bylo použito měření přesných drátkových etalonů ($620,5\text{ }\mu\text{m}$; $49,8\text{ }\mu\text{m}$) viz obr. 6.2. V rámci disertační práce je podrobně popsán a odůvodněn zvolený postup měření. Dosažené výsledky měření jsou v rámci práce statisticky vyhodnoceny a komentovány.

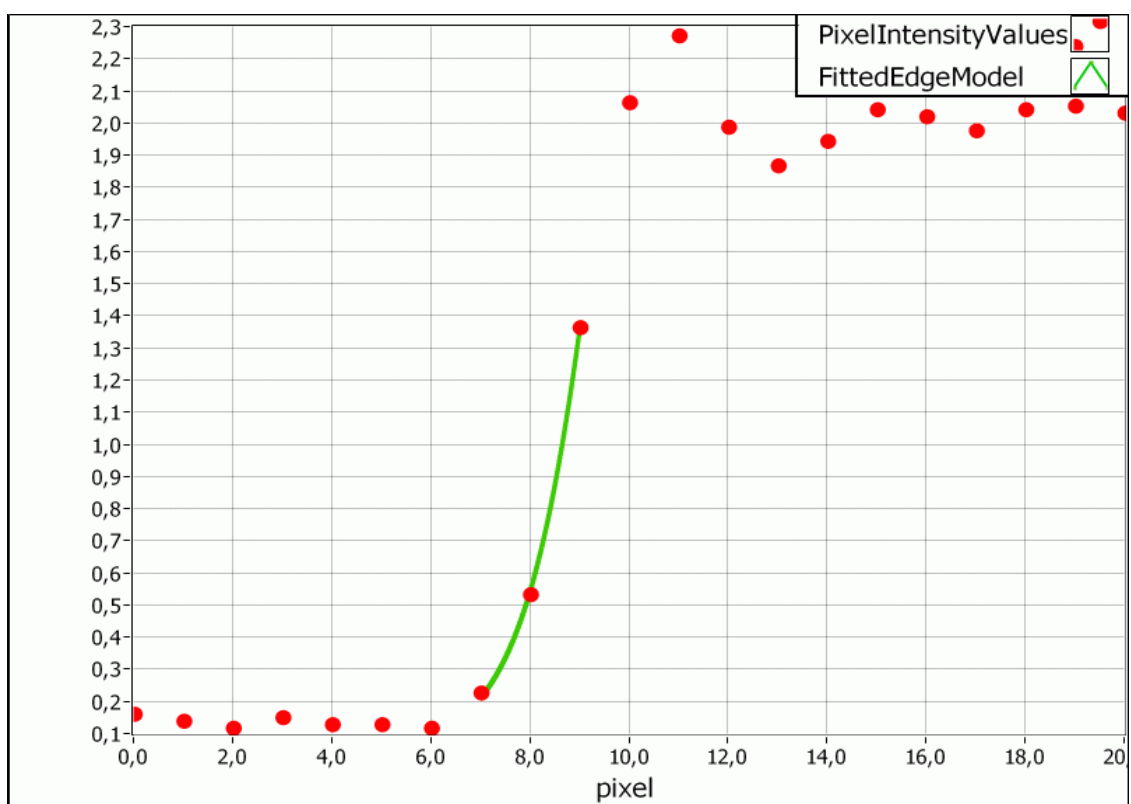


Obr. 6.1 Tester2D – akreditovaný měřicí systém pro testování průmyslových sít

a) etalon 620,5 μm



b) aproximovaná reálná náběžná hrana



Obr. 6.2 Ukázka vyhodnocené oblasti měřeného etalonu 620,5 μm spolu s reálnou přechodovou hranou aproximovanou navrženou modelující funkcí

7 ZÁVĚR

V úvodních částech disertační práce byly představeny důvody proč se daným tématem zabývat, dále byla stručně zhodnocena pozice řešeného problému z hlediska aktuálního stavu problematiky v souvisejících technických oblastech a byly definovány cíle a očekávané výstupy práce.

Na principech geometrické optiky byla odůvodněna vhodnost použití telecentrické optické soustavy v předmětovém prostoru v kombinaci s telecentrickým osvětlením pro metrologické aplikace. Byl odvozen vztah definující hloubku předmětového pole telecentrické optické soustavy v předmětovém prostoru (4-2). Na tomto vztahu byly dokázány pozitivní dopady použití telecentrického osvětlení na zvýšení hloubky předmětového pole a odstranění přímé závislosti tohoto parametru na průměru aperturní telecentrické clony (4-3). Tyto vztahy jsou nezbytné pro další odvození a diskuzi výsledků odvození v navazujících částech práce.

Geometrická optika neumožňuje analyzovat problematiku zobrazování předmětu na úrovni rozložení optického pole a není proto vhodná pro hledání fyzikálního modelu přechodových hran předmětů zobrazovaných optickou soustavou. Za tímto účelem byla provedena detailní analýza konkrétního zobrazovacího systému zobrazujícího definovaný předmět zájmu (viz obr. 4.1) na základě pravidel Fourierovské optiky. Výsledkem analýzy je vztah definující rozložení optického pole v obrazovém prostoru a tedy i v místě umístění snímacího prvku. Tento vztah nese komplexní informaci o zobrazení definovaného předmětu zájmu telecentrickým optickým systémem s telecentrickým zadním osvětlením do snímací roviny. Dalším odvozením z něj byl získán fyzikální model zobrazení předmětu zájmu ve snímací rovině (4-10). Model byl podroben detailní diskuzi parametrů, na základě níž byl odvozen vztah určující hodnotu intenzity (4-11) odpovídající skutečné pozici obrysu předmětu zájmu při jeho zobrazení definovaným způsobem. Odvozený fyzikální model zobrazení předmětu zájmu byl realizován v programovacím jazyce LabView a jeho odezvy pro konkrétní nastavení parametru optické soustavy byly analyzovány z pohledu vlivů na odvozený vztah určení skutečné pozice obrysu předmětu (obrysového bodu). Byly stanoveny limity tohoto modelu z pohledu rozostření optické soustavy a velikosti opticky propustné části předmětu zájmu. Z fyzikálního modelu zobrazení předmětu zájmu byl formou aproximace okrajových podmínek stanoven fyzikální model přechodové hrany (4-12) a provedena diskuze chyby této aproximace. Fyzikální model přechodové hrany (4-13) obsahuje ve své definici *Fresnelovy integrály*, což jsou tzv. vyšší *transcendentní funkce* a nelze je tedy vyjádřit pomocí *elementárních funkcí*. Diskuzí fyzikálního modelu bylo prokázáno, že na tvorbě přechodové hrany se podílí pouze konkrétní část *Fresnelových integrálů*, pro kterou je možné použít polynomiální aproximaci se zcela zanedbatelnou maximální chybou aproximace v řádu $1 \cdot 10^{-16}$. Pomocí této polynomiální aproximace *Fresnelových integrálů* byl z fyzikálního modelu přechodové hrany (4-13) odvozen vztah pro modelující funkci (5-7) určenou

k optimalizované aproximaci přechodové hrany v obraze. Modelující funkce je stále zcela propojena s fyzikální realitou vycházející z odvozeného vztahu pro rozložení optického pole v obrazovém prostoru, a proto pro ni platí i odvozený vztah definující způsob určení skutečné pozice obrysu předmětu (4-11).

V navazující části práce byla provedena diskuze dopadů vzorkování přechodové hrany optickým snímačem do podoby diskrétních hodnot jasu v pixelech výstupního obrazu kamery. Z této diskuze a z podoby průběhů reálných přechodových hran byla stanovena stěžejní doporučení charakterizující metodu optimalizované aproximace jasových hodnot pixelů modelující funkcí přechodové hrany (5-7). Navržené zásady byly nejprve ověřeny proložením syntetických dat a určením dopadu aproximace na chybu detekce skutečné pozice hrany předmětu.

Pro ověření přesnosti navržené metody s reálnými obrazovými daty bylo nejprve nutné tuto metodu algoritmizovat a začlenit do měřicího systému Tester2D. V úvodu 6. kapitoly je měřicí systém Tester2D představen a ve formě příloh jsou poskytnuty doklady o jeho akreditaci ČIA a o výsledcích mezilaboratorního porovnávání pod záštitou ČMI. V závěru práce je předložena ukázka výsledků dosažených navrženou metodou při měření etalonů délky ($620,5\ \mu\text{m}$; $49,8\ \mu\text{m}$). Výsledky měření etalonů délky jsou v práci statisticky zpracovány a podrobně diskutovány.

Z hlediska definovaných cílů disertační práce lze říci, že byly naplněny. Měřicí systém Tester2D byl v roce 2009 akreditován (viz příloha 1) pro měření geometrických rozměrů v rozsahu $40\ \mu\text{m} - 20\ \text{mm}$ s přesností až $0,1\ \mu\text{m}$. Byla odvozena fyzikálně podložená modelující funkce přechodové hrany předmětu zájmu (5-7) v podobě vhodné pro algoritmizaci. Byl stanoven způsob detekce přesné pozice obrysu předmětu zájmu v rámci modelující funkce přechodové hrany. Byla navržená metoda optimální aproximace reálných přechodových hran v obraze uvedenou modelující funkcí. Uvedená metoda byla implementována v programovacím jazyce LabView 6.1 a její přesnost ověřena. V průběhu jejího začlenění do již existujících částí původní měřicí metody v systému Tester2D, byla nově realizována nebo modifikována řada dalších algoritmů zpracování obrazů.

Mimo výše uvedeného je v rámci měřicího systému Tester2D autor disertační práce autorem uživatelského rozhraní měřicího systému, algoritmů automatického řízení pohonů křížového stolu dle vloženého typu síta (čtvercová oka, kruhová oka, obdélníková oka), metody automatické optimalizace expozice a algoritmů statistického vyhodnocení výsledků měření v návaznosti na příslušné požadavky norem ČSN ISO pro konkrétní typy průmyslových sít.

Koncepce původního měřicího systému byla podrobně publikována ve formě konferenčních příspěvků členů řešitelského týmu a průběžných či závěrečných oponovaných zpráv o řešení projektu, viz např. [42], [43], [44], [45], [46]. Nově vytvořená metoda byla postupně v průběhu jejího vývoje publikována autorem disertační práce v podobě konferenčních příspěvků na řadě zahraničních a domácích konferencí. Z pohledu disertační práce lze považovat za stěžejní následující publikace [37], [38], [39], [40].

LITERATURA

- [1] BASS, M. (Authors Collective), *HANDBOOK OF OPTICS Volume I Fundamentals , Techniques, and Design*, THE McGRAW-HILL COMPANIES, INC., 1995, 1606 s., ISBN 0-07-047740-7.
- [2] GÄSVIK K. J. *Optical Meterology Third Edition*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2002, ISBN 0-470-84300-4.
- [3] BORN, M. , WOLF, E. *Principles of Optics, 6th ed.*, Pergamon Prss Ltd., Oxford, 1985, ISBN 0-08-026482-4.
- [4] GOODMAN W. J. *Introduction to Fourier optics second edition* THE McGRAW-HILL COMPANIES, INC., 1996, ISBN 0-07-0242254-2.
- [5] BANARJEE, P. P., POON, T. CH. *Principles of Applied Optics*, Richard D. Irwin, Boston, 1991, ISBN 0-256-08860-8.
- [6] RÖMER, H. *Theoretical Optics* ,2005, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 3-527-40429-5.
- [7] Princeton Instruments. *MegaPlus EC16000 digital camera*. Dostupné z <http://www.piaceton.com/>, 2008.
- [8] PULNiX. *TM-1320-15L Digital camera*. <http://www.jai.com> , 2008.
- [9] JAN, J. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů*. vědecké monografie. vědecké monografie. Brno: VUTUM Brno, 2002. 427 s. ISBN: 80-214-1558-4.
- [10] GRADŠTEJN, I. S., RYZIK, I. M. *Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij* GIFML, Moskva, Fizmatgis, 1962, 1100s.
- [11] BRYČKOV I. A., MARICEV O. I., PRUDNIKOV, A. P. *Tablicy neopredelennych integralov*, Moskva, Nauk, 1986, 191s.
- [12] [BOKOR, N.](#), [DAVIDSON, N.](#) *Ideal collimation, concentration, and imaging with curved diffractive optical elements*, Review of Scientific Instruments, Volume 76, Issue 11, pp. 111101-111101-17 (2005).
- [13] MOSHIER, S., L. *Methods and Programs for Mathematical Functions* Ellis Horwood Ltd, New York, 1998, 300 s., ISBN10: 0135789982, ISBN13: 9780135789988.
- [14] MOSHIER, S., L. *Cephes Math Library Release 2.8* June, 2000 [online] <http://www.codecogs.com/cog-164>.
- [15] NOCEDAL J., WRIGHT J. S., *Numerical optimization* Springer, 1999, 636 s., ISBN 0387987932, 9780387987934.
- [16] CHRISTOPH, R., NEUMANN, H. J. , *Multisensor Coordinate Metrology*, Sv corporate media GmbH, Munich, 2003, 96 s., ISBN 3-938889-03-5.
- [17] National Instruments: *IMAQ Vision Concepts Manuals* National Instruments Corporation 2001 www.ni.com.
- [18] National Instruments: *LabView 6.1 Manuals* National Instuments Corporation 2001 www.ni.com.
- [19] THALES OPTEM: *Telecentric ZOOM 100 – 10:1 Optical System*, Dostupné 21.11 2008 z <http://www.qioptiqimaging.com/Products/ProductDisplay.aspx?productid=158>.
- [20] Sill Optics: *LED Colimator Datasheet*, Dostupné 21.11.2008 na <http://www.silloptics.com/english/downloads/ev22.pdf>.
- [21] PULNiX: *TM-1320 CCD Camera*, Dostupné 21.11.2008 na <http://www.pulnix.com/PDFs/IMG-PDFs/Obsolete/TM-1320-15CL.pdf> .

- [22] Berger Lahr: *Linear Step Motors*, Dostupné 28.11.2008 z http://www.berger-lahr.com/deutsch/pressemitteilungen/uploaded_files/press_33_1.pdf.
- [23] ČSN ISO 3310-1 *Zkušební síta. Technické požadavky a zkoušení, Zkušební síta z kovové tkaniny*. 1994.
- [24] ČSN ISO 3310-2 *Zkušební síta. Technické požadavky a zkoušení, Zkušební síta z děrovaného plechu*. 1994.
- [25] ČSN ISO 565. *Zkušební síta. Kovová tkanina, děrovaný plech a elektroformovaná folie. Jmenovitá velikost otvorů*. 1994.
- [26] STANĚK, TH. *Požadavky praxe na měření sít*. Technická zpráva, VUSH, a.s., Brno 2002.
- [27] HLAVÁČ, V., ŠONKA, M. *Počítačové vidění*, Grada a.s., 1992, ISBN 80-85424-67-3.
- [28] SOJKA E. *Digitální zpracování a analýza obrazů*, VŠB-TU Ostrava, 2000, ISBN 80-7078-746-5.
- [29] YU-SHAN LI, TZAY, Y., Y. Subpixel Edge Detection and Estimation with a Microprocessor-Controlled Line Scan Camera, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Bd. 35, Nr. 1, 1.1998, p. 105-112, XP002365316.
- [30] TRUCHETET, F., NICOLIER, F., LALIGANT, O. Subpixel Edge Detection for Dimensional Control by Artificial Vision, *Journal of Electronic Imaging*, vol. 10, iss. 1, pp. 234-239, 2001, ISSN: 1017-9909 (print); 1560-229X (online).
- [31] QU, Y.D., CUI, C.S, CHEN, S.B., LI, J.Q., A fast subpixel edge detection method using Sobel-Zernike moments operators, *Image and Vision Computing - IVC(23)*, No. 1, 1 January 2004, pp. 11-17. ISSN: 0262-8856.
- [32] BIN, T.J., LEI, A., CUI, J.W., KANG, W.J., LIU, D.D. Subpixel edge location based on orthogonal Fourier-Mellin moments, *Image and Vision Computing - IVC(26)*, No. 4, April 2008, pp. 563-569.
- [33] HERMOSILLA, T., BERMEJO, E., BALAGUER, A., RUIZ, L.A., Non-linear fourth-order image interpolation for subpixel edge detection and localization, *Image and Vision Computing - IVC(26)*, No. 9, 1 September 2008, pp. 1240-1248. ISSN: 0262-8856.
- [34] JUTZI, B., NEULIST, J., STILLA, U. Sub-pixel edge localization based on laser waveform analysis, *Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005.
- [35] NAGY, Z., VRBA, K. Accurate Imaging and Calibration Setup for 2D Non-contact Optical Measurements. In *VIII. Benalmadena: VIIP*, 2003. s. 200-203. ISBN: 0-88986-382-2.
- [36] NAGY, Z., VRBA, K., STEFICEK, R. Dimensional Measurement Using Highly Telecentric Illumination. In *Proceedings of International Conference Research in Telecommunication Technology – RTT 2003*, p. 67-70. ISBN 80-227-1934-X.

VLASTNÍ PUBLIKACE

- [37] KOHOUTEK, M.; VRBA, K. Image Processing Method Based on Subpixel Analysis for Accurate Measurement of Dimensions. In *n Sixth International Conference on Networking. Sixth International Conference on Networking, ICN 2007*. Sainte Luce - Martinique, IEEE Computer Society. 2007. p. 1 - 4. ISBN 0-7695-2805-8.
- [38] KOHOUTEK, M. The Interactive Measuring System Based on the Image Processing. In *Preceedings of Interantionale Conference on Signals and Systems ICSES 06*. Poland, Lodž, Technical University of Łódź, Institute of Circuit Theory, 2006. p. 383 - 386. ISBN 83-921172-6-3.
- [39] KOHOUTEK, M.; ČÍKA, P.; ŘÍHA, K. Subpixel Edge Detection with Optimized Fresnel Edge Fitting Method and Double Calibration Method. In *31st International Conference on TELECOMMUNICATIONS*

- AND SIGNAL PROCESSING TSP 2008. 1. Budapest, Budapest University of Technology and Economics. 2008. p. 86 - 89. ISBN 978-963-06-5487-6.
- [40] NAGY, Z., KOHOUTEK, M. Diffraction Pattern Analysis for Accurate 2D Non-Contact Dimensional Measurements. In *Proceedings of the Int. Conf. Visualisation, Imaging and Image Processing 2005*. edice. Benidorm, VIIP 2005. 2005. p. 1 - 6.
- [41] KOHOUTEK, M. New methods for automatic focusing of pictures acquired from a camera, realized in LabView. In *Proceedings RTT2005 Research in Telecommunication Technology 2005*. Hradec nad Moravicí, the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science the Department of Electronics and Telecommunications VŠB. 2005. p. 701 - 704. ISBN 80-248-0897-8.
- [42] VRBA, K., NAGY, Z., ŘÍHA, K., KOHOUTEK, M. Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na prototypu 2D testeru. Brno. 2004. p. 1 - 84.
- [43] VRBA, K., VESELY, J., NAGY, Z., WILFERT, O., HUIKA, P., KOHOUTEK, M. Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na prototypu 2D testeru. Oponovaná závěrečná výzkumná zpráva o řešení projektu MPO ČR, FD-K2/01. 59 stran. VUT v Brně. Brno, 2002.
- [44] NAGY, Z., WILFERT, O., VRBA, K., KOHOUTEK, M. Výzkum metod segmentace obrazu založených na hranových detektorech a objektových modelech. Oponovaná výzkumná zpráva o řešení projektu MPO ČR, FD-K2/01. 60 stran. VUT v Brně. Brno, 2002.
- [45] NAGY, Z., WILFERT, O., HUIKA, P., VRBA, K., KOHOUTEK, M. Výzkum metod předzpracování obrazu pro přesnou analýzu objektů v digitálních obrazech. Oponovaná výzkumná zpráva o řešení projektu MPO ČR, FD-K2/01. 59 stran. VUT v Brně. Brno, 2002.
- [46] NAGY, Z., WILFERT, O., VRBA, K., KOHOUTEK, M. Vývoj zvětšovací telecentrické optické soustavy a ověření algoritmů pro měření rozměrů. Oponovaná výzkumná zpráva projektu MPO ČR, FD-K2/01 za rok 2003-2004, Brno.
- [47] VRBA, K., NAGY, Z., KOHOUTEK, M. Automatizované řízení polohovacího křížového stolu v dvojdimenzionálním prostoru. Oponovaná výzkumná zpráva k řešení projektu FD1849291.
- [48] KOHOUTEK, M. Program pro automatické ostření obrazu realizovaný v LabView. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>). 2005. 2005(24). p. 1 - 1. ISSN 1213-1539.
- [49] KOHOUTEK, M.; KOVÁŘ, P.; ŠKORPIL, V. *Praktická TELEINFORMATIKA*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 140 p. ISBN 978-80-214-3747-0.
- [50] KOHOUTEK, M.; HANUS, S.; BURDA, K.; ZEMAN, V.; MOLNÁR, K.; NOVOTNÝ, V.; KOMOSNÝ, D. *Teleinformatika I*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 144 p. ISBN 978-80-214-3745-6.
- [51] KOHOUTEK, M.; SCHIMMEL, J.; BURGET, R.; JEŘÁBEK, J.; KYSELÁK, M. *Teleinformatika II*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 106 p. ISBN 978-80-214-3746-3.
- [52] HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M. Single-Output, High-Amperage Digitally Controlled Current Pulse Generator for Magnetic Therapy. In *Proceedings of 31th Telecommunications and Signal Processing conference*. Budapest, Asszisztencia Szervezo Kft. 2008. p. 1 - 4. ISBN 978-963-06-5487-6.
- [53] ČÍKA, P.; KOHOUTEK, M.; KOVÁŘ, P. Improved Digital Image Watermarking Method Based on DWT and SVD. In *31st International Conference on TELECOMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING TSP 2008*. 1. Budapest, Budapest University of Technology and Economics. 2008. p. 120 - 123. ISBN 978-963-06-5487-6.

- [54] ŠKORPIL, V.; KOHOUTEK, M. The Methodology of Telematic Subjects Creation. In *The Present and Future of Modern Transport*. CD. Praha, ČVUT Praha. 2008. p. 291 - 294. ISBN 978-80-01-04056-0.
- [55] NOVOTNÝ, V.; BODEČEK, K.; STEJSKAL, V.; ČÍKA, P.; KOHOUTEK, M. *Interaktivní aplikace pro digitální televizní vysílání*. FEKT VUT v Brně, Brno, ČR, FEKT VUT v Brně. 2008. p. 1 - 45.
- [56] KOHOUTEK, M.; ČÍKA, P.; NOVOTNÝ, V.; BODEČEK, K.; STEJSKAL, V. DVB-T broadcasting and MHP application development. In *Research in Telecommunication Technology RTT - 2007, Liptovský Ján*. Liptovský Ján, SR. 2007. p. 1 - 4. ISBN 978-80-8070-735-4.
- [57] ŠKORPIL, V.; KOHOUTEK, M. Celoživotní vzdělávání v oboru telematiky ve školství. In *CD sborník konference Telematika pro regionální dopravu 2007*. Plzeň, KPM Consult. 2007. p. 45 - 48. ISBN 978-80-239-9273-1.
- [58] RAMPL, I., VRBA, K., HANÁK, P., KOHOUTEK, M. *Výzkum a vývoj experimentálního léčebného zařízení LMG-4 pro kombinovanou magnetickou a optickou terapii*. Brno. 2006. p. 1 - 15.
- [59] KOHOUTEK, M.; BODEČEK, K.; NOVOTNÝ, V.; STEJSKAL, V. Experimentální pracoviště pro vývoj a testování interaktivních aplikací v sítích DVB-T. In *Proceedings RTT2006 Research in Telecommunication Technology 2006*. Brno. 2006. p. 36-40 (5 p.). ISBN 80-214-3243-8.
- [60] VRBA, K., BARTUŠEK, K., HANÁK, P., KOHOUTEK, M., KOULA, I. *Výzkum a vývoj číslicově řízeného impulsního magnetického plošného pole*. Brno. 2004. p. 1 - 50.

Curriculum Vitae

Jméno: Ing. Michal Kohoutek
Narozen: 7. 1. 1981 v Brně
Kontakt: kohoutek@feec.vutbr.cz

Vzdělání:

2004 – 2007 Postgraduální studium oboru Teleinformatika v programu Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně.
1999 – 2004 Magisterské studium v oboru Elektrotechnika a sdělovací technika na Fakultě elektrotechniky a informatiky Vysokého učení technického v Brně.
1994 – 1999 SPŠ Jedovnice, Na Větráku 463, Jedovnice, Obor: Automatizační technika.

Praxe:

2008 – dosud Flextronics Design, s. r. o. – vývojový pracovník.
2007 – 2008 Vědecko pedagogický pracovník na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně (plný úvazek).
2004 – 2007 Vědecko pedagogický pracovník na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně (částečný úvazek).

Účast na řešení projektů:

2008 – 2008 Účast na projektu „Výzkum vlivu kombinace látek pro cílenou imunoterapii a inhibičního působení pole impulsního vektorového magnetického potenciálu na nádorová onemocnění“.
2006 – 2008 Účast na projektu "Celoživotní vzdělávání a profesní příprava v oboru teleinformatiky, telematiky a dopravní telematiky".
2005 – 2008 Účast na výzkumném záměru „Elektronické komunikační systémy a technologie nových generací“.
2007 – 2007 Účast na projektu „Zavedení laboratorních cvičení do předmětu "Zabezpečovací systémy"“.
2007 – 2007 Účast na projektu „Inovace výuky předmětu Vzájemný převod analogových a digitálních signálů“.
2005 – 2007 Účast na projektu „Univerzální architektura pro poskytování interaktivních informačních služeb terestriální digitální televize“.

2004 – 2007	Účast na projektu „Výzkum účinků číslicově řízeného impulsního magneticko-laserového pole a příprava vývoje nového typu léčebného přístroje“.
2006 – 2006	Získání projektu FRVŠ 3218/2006 „Teorie číslicového zpracování obrazů a její grafická prezentace ve výuce“.
2003 – 2004	Účast na projektu „Výzkum nových metod zpracování obrazu pro přesná měření rozměrů ve stavebnictví a jejich ověření na typu 2D testeru“.

Pedagogické aktivity:

- Výuka akreditovaných předmětů bakalářského studia oboru Teleinformatika a magisterského studia oboru Telekomunikační a informační technika na FEKT VUT v Brně – vedení laboratorních cvičení z předmětů:
 - Pokročilé techniky zpracování obrazů,
 - Multimedialní služby,
 - Multimedia,
 - Vysokorychlostní komunikační sítě,
 - Počítače a programování 1,
 - Počítače a programování 2.
- Úspěšné vedení 10 bakalářských a 7 diplomových prací.
- Hlavní spoluautor monografie pro podporu celoživotního vzdělávání v oboru Teleinformatika
 KOHOUTEK, M.; KOVÁŘ, P.; ŠKORPIL, V. *Praktická TELEINFORMATIKA*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 140 p. ISBN 978-80-214-3747-0.
- Spoluautor 2 monografií pro podporu výuky v oboru Teleinformatika na Vysokých školách
 KOHOUTEK, M.; HANUS, S.; BURDA, K.; ZEMAN, V.; MOLNÁR, K.; NOVOTNÝ, V.; KOMOSNÝ, D. *Teleinformatika I*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 144 p. ISBN 978-80-214-3745-6.
 KOHOUTEK, M.; SCHIMMEL, J.; BURGET, R.; JEŘÁBEK, J.; KYSELÁK, M. *Teleinformatika II*. 1. Tribun EU, s. r. o., Gorkého 41, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně. 2008. 106 p. ISBN 978-80-214-3746-3.

Další aktivity:

Autor a spoluautor 7 registrovaných prototypů

- KOHOUTEK, M.; VRBA, K.: *Měřič sít - Prototyp zařízení pro přesné mikrometrické testování prosévacích sít pro stavební a potravinářský průmysl*. Prototyp je uložen ve firmě VÚSH a.s., Hněvkovského 30/65, Brno.
- KOHOUTEK, M.: *ImProTeach - Image Processing Teacher v. 1.0*. FEKT VUT Brno (software).
- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.: *VS-1 - Jednovýstupový výkonový číslicově řízený zdroj proudových pulsů pro magnetoterapii*. Prototyp je uložen na pracovišti: Ústav telekomunikací, FEKT VUTBR, Purkyňova 118, 61200 Brno.
- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.: *LMG-4 - Prototyp léčebného zařízení LMG-4 pro kombinovanou magnetickou a optickou terapii*. Prototyp je uložen na pracovišti: Ústav telekomunikací, FEKT VUTBR, Purkyňova 118, 61200 Brno.

- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.; KOULA, I.: *MG-3 - Prototyp léčebného zařízení MG-3 s pružným aplikátorem využívající planární cívky pro kožní magnetoterapii*. Prototyp je uložen na pracovišti: Ústav telekomunikací, FEKT VUTBR, Purkyňova 118, 61200 Brno.
- HANÁK, P.; VRBA, K.; KOHOUTEK, M.: *GP-P1 - Prototyp zařízení GP-P1 pro léčbu kožního onemocnění Adipositas oedematosa*. Prototyp je uložen ve firmě ENJOY s.r.o., Brno.
- NOVOTNÝ, V.; KOHOUTEK, M.; STEJSKAL, V.; ČÍKA, P.; BODEČEK, K.: *PeopleMetr - TV-meter-MHP*. UTKO, FEKT Vysoké učení technické v Brně, Purkyňova 118, Brno.

ABSTRACT

The doctoral thesis is focused on a design of a new original image transition edge physical modeling method for exact object shape position determination. Automatic Optical Inspection systems for the high accuracy optical measurements is main application area for designed method.

The new method design is based on precise physical analysis of a defined imaging system. Object side telecentric lens, telecentric backlight source and CCD video camera are main parts of the analyzed imaging system. New image transition edge physical model and method for accurate shape position detection within the model are derived by geometrical and Fourier optics imaging system analysis. Possible influences of the model parameters changes to the accuracy of shape position detection are studied precisely. A new modeling function suitable for implementation in a new optimal approximation method is derived from the physical transition edge model. The modeling function optimal approximation method is implemented in to a Tester2D measuring system and verified by length etalon measurements. The Tester2D measuring system was successfully accredited for dimensions measurement in range $40\mu\text{m} - 20\text{mm}$ with accuracy up to $0,1\mu\text{m}$. Documentation of results of the accreditation process with the record of obtained results from measurement system in scope of preformed interlaboratory comparison tests are appended to the doctoral thesis.